

Université de Montréal

Phénotypage computationnel de l'interaction sociale dans le développement psychopathologique
et neurotypique

Par

Lisane Moses

Département de psychologie, Faculté des arts et des sciences

Mémoire présenté en vue de l'obtention du grade de Maîtrise ès sciences (M.Sc)
en Psychologie

Août 2023

© Lisane Moses, 2023

Université de Montréal

Département de psychologie, Faculté des arts et des sciences

Ce mémoire intitulé

**Phénotypage computationnel de l'interaction sociale dans le développement
psychopathologique et neurotypique**

Présenté par

Lisane Moses

A été évalué par un jury composé des personnes suivantes

Ian Charest

Président-rapporteur

Baudouin Forgeot d'Arc

Directeur de recherche

Guillaume Dumas

Codirecteur

Vincent Taschereau-Dumouchel

Membre du jury

Résumé

Le Trouble du Spectre de l'Autisme (TSA) est un trouble neurodéveloppemental défini par deux caractéristiques principales : un comportement social atypique et des intérêts restreints et répétitifs incluant une rigidité comportementale. Le comportement social atypique est typiquement mesuré et quantifié par des déficits de Théorie de l'Esprit (ToM). Les outils classiques pour évaluer la ToM comportent plusieurs limites dont les biais liés à la subjectivité, la pauvre validité écologique et le manque d'échange réciproque. Ainsi, une tâche dyadique et intégrative pourrait pallier ces limites. En population adulte autiste, une telle tâche a été testée. Concrètement, le jeu du *Penny-Hiding Game* (PHG), où un joueur doit deviner dans laquelle de ses mains un adversaire a caché une pièce de monnaie, a été administré à un groupe de personnes autistes et un groupe de personnes non-autistes. La tâche comportait deux contextes : l'un social, où le participant croyait qu'il jouait contre un être humain en ligne, et l'un non-social, où le participant était informé qu'il jouait contre un ordinateur seulement. Cette étude a montré que les personnes autistes se montraient insensibles au contexte dans leur comportement modélisé par un phénotype computationnel comportant deux indices : la sophistication et la flexibilité. De plus, l'étude a identifié une stratégie de jeu qui semblait propre au groupe autiste. Le phénotype computationnel permettait aussi de classer les participants avec un taux de spécificité équivalent aux outils diagnostiques standards. La présente étude vise donc à étendre cette compréhension de la réciprocité sociale des personnes autistes à une population pédiatrique. L'enjeu des comorbidités en autisme constitue également un frein important aux avancées scientifiques. Ainsi, nous avons décidé d'inclure deux groupes dans notre échantillon qui présentent les comorbidités les plus prévalentes en autisme : le Trouble de l'Attention avec et sans Hyperactivité (TDAH) et les Troubles Anxieux (TA). À la suite d'une analyse de la performance avec ces trois groupes et une inspection visuelle des séquences de choix au cours de la tâche, un paramètre d'alternance/persévération et un groupe d'enfants neurotypiques (NT) ont été ajoutés. Ces deux ajouts font de ce mémoire une étude partiellement exploratoire. Le but était donc de valider la tâche informatique du PHG auprès de populations pédiatriques cliniques, d'identifier et d'explorer des différences de groupes au niveau des stratégies de jeu, de la performance et du phénotype computationnel et d'explorer le rôle potentiel des associations entre le phénotype computationnel, la performance et les symptômes associées aux trois conditions cliniques à l'étude : les symptômes autistiques, attentionnels/exécutifs et anxieux. Les analyses ont

permis de révéler que le groupe NT avait une performance significativement supérieure aux groupes TSA, TDAH et TA et que la quantité et la sévérité des symptômes étaient négativement associées au score de performance en contexte social. La stratégie la plus utilisée à travers tous les groupes et indépendamment du contexte était une stratégie d'apprentissage par renforcement et aucune différence au niveau de la sophistication ou de la flexibilité n'a été détectée. Ces deux résultats constituent une non-réplication de ce qui a été observé chez les adultes. La persévérance dans la tâche était plus élevée chez les personnes autistes spécifiquement, ce qui constitue un marqueur potentiel pour dépister, et éventuellement identifier le TSA, bien que d'autres études soient nécessaires pour le confirmer. Cette étude novatrice a permis d'illustrer la complexité de la réalité clinique et de mettre la table pour des études subséquentes en psychiatrie computationnelle auprès des enfants.

Mots-clés : Autisme, Troubles Neurodéveloppementaux, Trouble de l'Attention avec ou sans Hyperactivité, Troubles Anxieux, Réciprocité Sociale, Cognition Sociale, Psychiatrie Computationnelle.

Abstract

Autism Spectrum Disorder (ASD) is a neurodevelopmental disorder defined by two main diagnostic criteria: atypical social communication and restricted, repetitive interests including behavioral rigidity. Atypical social communication is typically measured and quantified by deficits in Theory of Mind (ToM). Conventional tools for assessing ToM have several limitations, including subjectivity bias, poor ecological validity and lack of reciprocal exchange. A dyadic, integrative task could be used to overcome these limitations. Such a task was tested in an adult autistic population. Specifically, the Penny-Hiding Game (PHG), in which a player must guess in which of his or her hands an opponent has hidden a coin, was administered to a group of autistic and a group of non-autistic individuals. The task was comprised of two framings: one social, where the participant believed he or she was playing online against a human being, and one non-social, where the participant was informed that he or she was playing against a computer. This study showed that autistic adults were insensitive to the framing in their behavior, which was modeled by a computational phenotype made up of two indices: sophistication and flexibility. In addition, the study identified an adaptation strategy that appeared to be specific to the autistic group. The computational phenotype also made it possible to classify participants with a specificity equivalent to standard diagnostic tools. The present study therefore aims to extend this understanding of social reciprocity in people with autism to a pediatric population. The issue of comorbidities in autism is also a major obstacle to scientific progress. We therefore decided to include in our sample two groups with the most prevalent comorbidities in autism: Attention-Deficit with or without Hyperactivity Disorder (ADHD) and Anxiety Disorder (AD). Following an analysis of performance with these three groups and visual inspection of choice sequences during the task, an alternation/perseveration parameter and a neurotypical (NT) group were added. These two additions make this master's thesis partially exploratory. The aims were therefore to validate the PHG computerized task with clinical pediatric populations, to identify and explore group differences in adaptation strategies, performance and computational phenotype, and to explore the potential role of associations between computational phenotype, performance and symptoms associated with the three clinical conditions included in the study: autistic, attentional/executive and anxious symptoms. Analyses revealed that the NT group performed significantly better than the ASD, ADHD and AD groups, and that symptom quantity and severity were negatively

associated with task performance score in the social framing. The most frequently used strategy across all groups and regardless of framing was reinforcement learning, and no differences in sophistication or flexibility were detected. These two results represent a lack of replication of previous work with autistic and NT adults. Perseverance in the task was higher in autistic individuals, which could be a potential marker for screening - possibly identifying - ASD, although further studies are needed to confirm this. This novel study helped illustrate the complexity of clinical contexts and set the table for subsequent computational psychiatry studies with children.

Keywords: Autism, Neurodevelopmental Disorders, Attention-Deficit with or without Hyperactivity Disorder, Anxiety Disorders, Social Reciprocity, Social Cognition, Computational Psychiatry.

Table des matières

Résumé	5
Abstract	7
Table des matières	9
Liste des tableaux	13
Liste des figures	15
Liste des sigles et abréviations	17
Remerciements	20
Introduction	21
Position du problème.....	22
Contexte théorique	22
Réciprocité sociale et autisme	22
Cognition sociale et mentalisation	23
Trouble du Spectre de l'Autisme	24
Hétérogénéité	25
Théories étiologiques du TSA.....	25
Troubles neurodéveloppementaux comorbides.....	26
Trouble de l'attention avec ou sans hyperactivité.....	27
Troubles anxieux.....	28
Approche catégorielle versus dimensionnelle.....	29
Mesures de la réciprocité sociale	29
Questionnaires cliniques standardisés.....	30
Outils diagnostiques	31
Tâches comportementales	32

Limites des outils classiques	34
Jeux d'interaction	36
Stag Hunt game	36
Penny-hiding game (jeu de la pièce cachée)	37
Phénotypage computationnel de la réciprocité sociale	37
Phénotypage computationnel de la population adulte neurotypique.....	40
Phénotypage computationnel de la population adulte TSA	40
Objectifs et hypothèses.....	42
Article.....	47
Abstract	48
Introduction	50
Methods.....	52
Participants	52
Ethics.....	52
Procedure.....	53
Experimental Task.....	53
Social Framing (“Hide and Seek”).....	54
Non-social Framing (“A Picky Chick”).....	55
Clinical Measures	56
Autistic Symptoms Measures.....	56
Total Score: SCQ (Social Communication Questionnaire; Lifespan version).....	56
Thought Problems and Social problems: CBCL/6-18 (Child Behavior Checklist for Ages 6-18)	56
ADHD Symptoms Measures	56
Conners 3 complete parent version	56

BRIEF (Behavior Rating of Executive Function).....	56
Anxious Symptoms Measures.....	57
Anxiety Problems: CBCL-6/18.....	57
SCARED (The Screen for Child Anxiety Related Emotional Disorders)	57
Global Symptomatology	57
Total Problems: CBCL-6/18	57
Differentiation of Groups	57
Computational Modeling of Adaptation Strategies.....	58
<i>k</i> -ToM Models.....	59
Influence Learning (Hampton, 2008).....	60
Volatile Bayesian Learner.....	60
Reinforcement learning.....	60
Win-stay/loose-switch.....	60
Random-biased (RB).....	60
Analysis set-up and behavioral analysis.....	61
Statistical analysis	62
Data and code availability	62
Results	62
Estimated frequencies of adaptation strategies	62
Performance	65
Computational phenotype	67
Discussion	70
Conclusion.....	73
Authors' contributions.....	73
Acknowledgements	73

Competing interests.....	74
Discussion	75
Persévérance chez les enfants autistes	76
Performance et associations avec les mesures cliniques	77
Homogénéité du phénotype computationnel.....	78
Non-réplication des résultats chez la population autiste adulte	80
Limites.....	81
Études futures.....	82
Applications cliniques	83
Conclusion.....	84
Références bibliographiques	85

Liste des tableaux

Tableau 1. –	Descriptive statistics	52
Tableau 2. –	Competitive payoff table	58
Tableau 3. –	Exploratory correlation matrix	68

Liste des figures

Figure 1. – La tâche de Sally et Anne (Felisberti & King, 2017).....	33
Figure 2. – La tâche informatisée du PHG	38
Figure 3. – Illustration de la tâche informatisée et décomposition de l’analyse computationnelle	42
Figure 4. – Illustration essai par essai de la tâche informatisée décomposition des deux volets d’analyses.....	45
Figure 5. – Illustration of the stimuli of the PHG task and decomposition of a trial; (A) Social framing (“Hide and Seek”); (B) Non-social framing (“A Picky Chick”)	55
Figure 6. – Estimated model frequencies for each group performed by RFX-BMC	64
Figure 7. – Two way interaction between opponent and group for performance scores.....	66
Figure 8. – Perseveration/alternance main effects. (A) Opponent; (B) Group	69

Liste des sigles et abréviations

AD : Anxiety Disorders

ADHD : Attention-Deficit with or without Hyperactivity Disorder

ADI-R : Autism Diagnostic Interview-Revised

ADOS : Autism Diagnostic Observation Schedule

AQ : Autism-Spectrum Quotient

ASEBA : The Achenbach System of Empirically Based Assessment

APA : American Psychiatric Association

ASD : Autism Spectrum Disorder

BRIEF : Behavior Rating of Executive Function

CBCL : Child Behavior CheckList

CDC : Centers for Disease Control and Prevention

CHADIS : Clinical Process Support System for Comprehensive Care

DI : Déficience Intellectuelle

DSM-5 : Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders, 5th Edition

GEC : Global Executive Composite

INSERM : Institut du Cerveau et de la Moelle Épineière

NT : Neurotypical ou Neurotypique

QI : Quotient Intellectuel

PHG : Penny-Hiding Game

SCARED : The Screen for Child Anxiety Related Emotional Disorders

SCQ : Social Communication Questionnaire

SHG : Stag-Hunt Game

SRS : Social Responsiveness Scale

RB : Random Biased

RFX-BMC : Random-Effect Bayesian Model Comparison

RL : Reinforcement Learning

TA : Troubles Anxieux

TDAH : Trouble de l'Attention avec ou sans Hyperactivité

TSA : Trouble du Spectre de l'Autisme

ToM : Theory of Mind ou Théorie de l'Esprit

VABS : Vineland Adaptive Behavior Scales

VBA : Variational Bayesian Analysis

WSLS : Win-Stay/Lose-Switch

To Christopher. Your short time with us will never be forgotten.

Remerciements

Tout d'abord, je désire remercier mes deux superviseurs, Baudouin Forgeot d'Arc et Guillaume Dumas. Baudouin, c'est toi qui m'aies donné ma chance et qui a su voir mon potentiel en recherche, avant même que j'en prenne connaissance, merci beaucoup. Guillaume, ta présence et ton implication dans mon projet de recherche ont été indispensables à la progression et la réussite de ce dernier. Sans toi, ce projet n'aurait pu être mené à bien. Un incroyable merci à vous deux.

Ensuite, je veux remercier mes collègues, devenus amis, de m'avoir écouté et supporté tout au long de ma maîtrise : Quentin, Katelyn, Mariem et Lena. Je devais vous nommer de nom, mais je suis également extrêmement reconnaissante pour le support de tous les autres membres de l'équipe de Physiologie Sociale et Psychiatrie de Précision. Merci pour les échanges, les conseils et la motivation.

Également, je remercie ma sœur : Marie. Ma moitié, ma confidente. Tu m'as permis de rester saine d'esprit et de ne jamais oublier que la vie ne se résume pas à compléter son mémoire de maîtrise. Merci, je t'aime.

Merci à mes parents qui m'ont encouragé par tous les moyens dans ce projet, dans tous mes projets passés et qui continueront sans doute à le faire dans mes projets futurs. Merci pour toutes les qualités et les valeurs honorables que vous m'avez inculqué. Je suis fière de la personne que je suis aujourd'hui grâce à vous.

Finalement, merci à ma personne, mon meilleur ami, my home : Max. I couldn't have done it without you. Merci pour ton support inconditionnel à chacune des étapes et d'avoir été là pour accueillir les milliers d'émotions que j'ai ressentie pendant cette aventure.

Introduction

Position du problème

La cognition sociale englobe les processus cognitifs plus ou moins spécifiques aux interactions sociales (Adolphs, 2001) à partir desquels il est possible d'inférer les croyances et les intentions d'autrui (Green et al., 2008) et d'éventuellement prédire leur comportement (Baron-Cohen et al., 2001). La Théorie de l'Esprit (ToM pour *Theory of Mind*), concept proposé par Premack et Woodruff (1978), concerne précisément l'attribution d'états mentaux à autrui. Certaines pathologies semblent présenter des difficultés au niveau de ces habiletés (Frith, 1994). En effet, le Trouble du Spectre de l'Autisme (TSA) est caractérisé par des interactions sociales atypiques, c'est-à-dire des « déficits de réciprocité sociale ou émotionnelle, des comportements non verbaux et du développement et maintien de la compréhension des relations » (American Psychiatric Association (APA), 2013). Nous définissons la réciprocité sociale (qui englobe aussi la réciprocité émotionnelle pour le cadre de ce projet) comme l'habileté d'un individu à s'engager dans des interactions sociales entre deux personnes ou plus (Schwartz et al., 2021). Ce projet de recherche vise à découvrir, à l'aide d'une approche computationnelle, les mécanismes cognitifs recrutés lors d'échanges sociaux demandant un ajustement dynamique. Il sera argumenté que le phénotype computationnel peut être divisé en deux indices lors d'une tâche mesurant la réciprocité sociale. Le développement de cette capacité se fait au cours de l'enfance. Nous tenterons donc d'établir une trajectoire développementale typique. Nous tenterons aussi d'examiner ce mécanisme cognitif dans le TSA, vu sa définition incluant un ajustement social atypique. Vu la haute comorbidité de ce trouble avec, notamment, le Trouble de l'Attention avec ou sans Hyperactivité et les Troubles Anxieux, nous comparerons aussi les deux échantillons mentionnés plus haut avec des enfants présentant ces deux troubles. Le but de cette étude est de valider si l'utilisation d'une tâche interaction mesurant la réciprocité sociale parvient à différencier une population neurotypique de populations cliniques via la performance ou le phénotype computationnel et si ces derniers sont associés à des symptômes psychiatriques.

Contexte théorique

Réciprocité sociale et autisme

Ayant conscience de l'absence de consensus sur le débat entourant de la dénomination de cette population, je m'aligne à la terminologie du DSM-5 en employant le terme TSA pour parler du

Trouble du Spectre de l'Autisme (APA, 2013). Je m'aligne également à la communauté en utilisant le terme personnes autistes en parlant de la population (Bottema-Beutel et al., 2021), ceci dans l'objectif de respecter tous les partis concernés.

Cognition sociale et mentalisation

On appelle « mentalisation » ou « théorie de l'esprit » (ToM pour *Theory of Mind*) le concept représentant la capacité d'un individu à attribuer des états mentaux, des désirs et des croyances aux autres (Premack & Woodruff, 1978). Cette habileté à effectuer des prédictions lors de situations sociales est un fort prédicteur du succès de celles-ci (Frith, 2007). La ToM intervient dans plusieurs situations de la vie quotidienne. Par exemple, lorsqu'une cliente offre sa carte de crédit à un employé, celui-ci peut facilement inférer que cela représente le désir de la cliente de payer et le moyen avec lequel elle désire le faire. La ToM est également couramment utilisée dans les situations de jeux, tant enfantins que pour adultes (p.ex., deviner où un enfant s'est caché, inférer la main d'un joueur lors d'une partie de poker). La raison pour laquelle cette capacité de prédiction est centrale dans le succès des interactions sociales est qu'elle permet de nous ajuster en fonction de notre prédiction de la réaction de l'autre. La mentalisation est utilisée de différentes manières au cours du développement ou dans certaines populations neurodiverses.

Le développement de la mentalisation débute vers l'âge de 13 mois avec une compréhension implicite des états mentaux d'autrui par l'attention conjointe (Castelli, 2015). En effet, l'attention conjointe implique que l'enfant est capable de comprendre non seulement ce qu'une autre personne regarde, mais aussi que lui et une autre personne regardent le même objet (Stone et al., 1998). Le langage influence également le développement des capacités de mentalisation par une compréhension explicite des états mentaux d'autrui vers 48 mois (Sodian & Kristen, 2015). Le développement de la ToM et du langage sont donc parallèles et permettent ainsi à l'enfant de mieux exprimer ses propres pensées et de comprendre celles de son entourage (Fitch et al., 2010). Ce développement d'une cognition sociale dite *sophistiquée* est influencé par la génétique, l'environnement et la culture (Adolphs, 2001; Skuse & Gallagher, 2011).

La réciprocité sociale, définie comme la capacité d'un individu à s'engager dans des interactions sociales avec une ou plusieurs personnes, est positivement associée avec le développement typique de la cognition sociale (Schwartz et al., 2021). La cognition sociale, lorsqu'elle est efficacement utilisée entre deux personnes ou plus, permet aux individus de reconnaître correctement les comportements

et pensées de leur interlocuteur pour y répondre adéquatement et ainsi, s'engager dans une interaction réciproque (Constantino et al., 2003). Il a effectivement été démontré que les capacités de mentalisation sont prédictives de l'ajustement réciproque lors d'une interaction chez des enfants d'âge préscolaire (Schug et al., 2016; Takagishi et al., 2010, 2014). D'ailleurs, des comportements liés à la réciprocité sociale, tel que la coopération, apparaissent au même moment que les capacités de mentalisation (House et al., 2013; Sebastián-Enesco & Warneken, 2015). Ainsi, par son apparition concomitante avec plusieurs autres comportements prosociaux, la ToM joue définitivement un rôle clé dans les interactions sociales réciproques.

Trouble du Spectre de l'Autisme

Des capacités de réciprocité sociale atypiques forment, par définition, le premier critère diagnostique principal du Trouble du Spectre de l'Autisme (ou TSA; APA, 2013). Le TSA est un trouble neurodéveloppemental généralement défini par une réciprocité socioémotionnelle altérée et une inflexibilité du comportement. Ce trouble présente une prévalence d'un pour 36 chez une population d'enfants de 8 ans et le ratio entre les sexes biologiques est de 4 garçons pour 1 fille selon le plus récent rapport du CDC (*Centers for Disease Control and Prevention*; Maenner et al., 2023). Auparavant séparé en différentes catégories, l'autisme est désormais vu comme un « spectre » depuis la parution du DSM-5 (*Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders, 5th Edition*) en 2013. Lors d'une évaluation diagnostique, le personnel clinique devra évaluer la présence des deux catégories de symptômes principaux du DSM-5 pour poser un diagnostic. La première catégorie relève une atteinte de la communication et de l'interaction sociale pouvant se manifester par : un déficit de la réciprocité socioémotionnelle, un déficit dans la communication non verbale (manque d'expression faciale, peu ou pas de contact visuel, ...) et un déficit dans le maintien des relations interpersonnelles et de leur compréhension (APA, 2013). La seconde catégorie de critères représente les caractères restreints et répétitifs des comportements et intérêts avec la présence d'au moins deux des critères suivants : comportements stéréotypés et répétitifs (verbaux ou moteurs), une ritualisation (marquée par une intolérance au changement), des intérêts inhabituels (pour un objet ou pour un sujet, marqué par son intensité) ou des particularités sensorielles (hypo- ou hyperréactivité) (APA, 2013). Le TSA peut aussi être accompagné de spécificateurs, vu la grande variété de présentation symptomatologique.

Hétérogénéité

Les spécificateurs suivants ont été ajoutés à ce diagnostic de par la grande hétérogénéité du spectre autistique et le haut taux de comorbidité : atteinte du langage, déficience intellectuelle (DI), association à une condition médicale (p. ex., épilepsie) ou génétique connue (p. ex., Syndrome du X fragile) ou à un autre facteur environnemental, association à un autre trouble neurodéveloppemental (p. ex., Trouble Anxieux, Syndrome Gilles de la Tourette), de santé mental ou comportemental (p. ex., Trouble de l'opposition) ou avec catatonie (APA, 2013). La présence de pathologies comorbides explique, en partie, la difficulté de prendre une position définitive quant au phénotype (expression visible du comportement reflétant les symptômes) de l'individu et complique ainsi le travail du diagnostic différentiel, c'est-à-dire le processus permettant de différencier des conditions qui présentent des symptômes proches ou similaires (Ghaziuddin et al., 2010). Les spécificateurs ont pour but de poser un diagnostic représentant plus fidèlement le phénotype individuel qu'un diagnostic binaire (Ousley & Cermak, 2014). Les difficultés liées à la réciprocité socioémotionnelle représentent un frein dans le développement du plein potentiel et l'atteinte du bien-être des personnes autistes, il est donc important de l'étudier (Kamp-Becker et al., 2011).

Théories cognitives du TSA

Il faut d'abord savoir que l'étiologie du TSA n'atteint pas un consensus au sein de la communauté scientifique et qu'elle est probablement un amalgame de plusieurs facteurs. Au travers les années, plusieurs mécanismes cognitifs et cérébraux ont été proposés pour expliquer le TSA, incluant un traitement atypique des stimuli sociaux (visage, voix,...) (Klin et al., 2003; Ristic et al., 2005), une faible motivation sociale (Chevallier et al., 2012) et un manque de cohérence centrale, soit la tendance à prioriser les détails plutôt que l'information globale lors du traitement perceptif (Happé & Frith, 2006).

L'une des théories les plus robustes pour expliquer la réciprocité sociale atypique dans le TSA est l'altération des capacités de mentalisation ou ToM (Baron-Cohen et al., 1985). Comme expliqué plus haut, les capacités de ToM font parties intégrantes des habiletés nécessaires pour naviguer les interactions sociales. Ainsi, si les capacités de mentalisation sont altérées, il sera difficile pour un individu de comprendre les comportements basés sur des états mentaux. Par exemple, les enfants autistes participent ou initient peu le jeu créatif ou symbolique partagé (faire semblant d'inventer

une histoire avec des figurines, donner le bain à une poupée, ...). De plus, les personnes autistes semblent présenter des difficultés au niveau de la compréhension d'aspects implicites de la communication qui nécessitent de comprendre les intentions (p. ex., l'ironie, le sarcasme). Comme les ajustements sociaux sont toujours réciproques, il faut aussi considérer que les personnes neurotypiques peuvent avoir de la difficulté à inférer les états mentaux des personnes autistes puisqu'ils diffèrent probablement des attentes communes. Ainsi, bien qu'on attribue la réciprocité atypique aux personnes autistes seulement, l'atypicalité est plutôt due à l'échange bidirectionnel mal ajusté venant des deux parties. Certaines études ont même montré une meilleure qualité de la relation entre des dyades de personnes autistes, comparativement à des dyades « mixtes » composées de personnes autistes et neurotypiques (Crompton, Hallett, et al., 2020; Crompton, Ropar, et al., 2020; Morrison et al., 2020). Quoiqu'il en soit, les capacités de ToM, plus précisément, la performance significativement inférieure des personnes autistes à des tâches de mentalisation, a été démontrée à plusieurs reprises dans des paradigmes expérimentaux (Baron-Cohen et al., 1985; Frith, Happé et Siddons, 1994; Sally & Hill, 2006).

Troubles neurodéveloppementaux comorbides

La prévalence du TSA a augmenté dans les dernières décennies (Maenner et al., 2023; Prior, 2003), potentiellement à cause d'une plus grande prise de conscience de ce trouble. Ceci justifie la pertinence de poursuivre les recherches pour mieux comprendre son étiologie et améliorer la qualité de vie des personnes autistes, significativement inférieure à celle de personnes sans trouble (Kamp-Becker et al., 2011). Cependant, plusieurs facteurs spécifiques au TSA constituent des freins aux avancées en recherche, dont l'hétérogénéité et le taux de comorbidités (Masi et al., 2017). Comme mentionné plus haut, le spectre autistique est très hétérogène en ce sens que la présentation symptomatologique varie grandement d'un individu à l'autre. En plus de cela, la prévalence importante des comorbidités dans le TSA complique encore plus la manifestation des différents symptômes en interagissant avec ceux-ci pour parfois les exacerber, parfois les camoufler (Ashwood et al., 2011). En effet, 63% des personnes autistes ont au moins une comorbidité psychiatrique (Simonoff et al., 2008). Les plus communes sont l'épilepsie (22-30% des cas; Tuchman & Rapin, 2002), les troubles anxieux (27,2%; Lugo-Marín et al., 2019), la dépression (21,2%; Lugo-Marín et al., 2019), le trouble de l'attention avec ou sans hyperactivité (27,4%; Lugo-Marín et al., 2019) et le syndrome de Tourette (4-5%; Kalyva et al., 2016). Les troubles psychopathologiques ne sont pas les seuls à être fortement associés avec le TSA. À titre

indicatif, des conditions médicales, telles que les problèmes de sommeil ou les troubles gastro-intestinaux, et génétique, comme le syndrome du X fragile, sont aussi communément rapportées (Chaidez et al., 2014; Kaufmann et al., 2017; Richdale & Schreck, 2009). La DI est un exemple manifeste de l'effet confondant des comorbidités dans l'autisme de par l'étendue très large de sa prévalence au sein du TSA (de 14,4% jusqu'à 70%; Bourke et al., 2016; Matson & Shoemaker, 2009). D'un côté, cela pourrait s'expliquer par l'application inadéquate des outils de mesures (p. ex., Weschler Intelligence Scale for Children, Raven Progressive Matrices) chez les personnes autistes, entraînant un manque de fiabilité du diagnostic de DI dans cette population. D'un autre côté, certains auteurs proposent plutôt que les déficits de communication sociale qui définissent le TSA se retrouvent aussi, dans une certaine mesure, chez toutes les personnes atteintes d'une DI, puisque cette dernière est caractérisée par un retard de développement général (Thurm et al., 2019). Il est également important de diagnostiquer les pathologies comorbides car elles peuvent parfois être traitables, ce qui a le potentiel d'améliorer la qualité de vie des patients et l'efficacité des interventions cliniques (Bauman, 2010; Fulton et al., 2014; Wood et al., 2009). Pour représenter cette réalité du contexte clinique, soit la haute prévalence de comorbidités psychiatriques, nous avons choisi d'étudier la population autiste en tenant en compte des dimensions associées, telles que les Troubles Anxieux (TA) et le Trouble du Déficit de l'Attention avec ou sans Hyperactivité (TDAH). Ceci démarque cette étude des normes actuelles des études empiriques, qui tentent de diminuer au maximum l'hétérogénéité de la population qu'elles étudient. Cependant, devant l'indéniable enjeu de comorbidité du TSA, nous tenterons, dans ce mémoire, de représenter la complexité de la réalité clinique en comparant des individus qui présentent un TSA, un TDAH et/ou un TA dans le but de tirer des conclusions qui pourraient potentiellement être plus valides dans un contexte écologique.

Trouble de l'attention avec ou sans hyperactivité

Le TDAH est un trouble neurodéveloppemental défini par des symptômes attentionnels, dysexécutifs, de l'hyperactivité et des comportements impulsifs (APA, 2013). Ces symptômes affectent la qualité de vie des individus et peuvent nuire aux interventions ciblant les symptômes principaux du TSA (Mahajan et al., 2012). De plus, l'hyperactivité et l'inattention (caractéristiques du TDAH) peuvent être fréquentes chez les personnes autistes (Ghaziuddin et al., 2010) et peuvent être difficilement distinguables de certaines caractéristiques autistiques (Ronald et al., 2006; Sokolova et al., 2017). Les difficultés de mentalisation peuvent également être exacerbées chez les

enfants autistes en présence d'un diagnostic de TDAH (Sprenger et al., 2013). Par exemple, chez les enfants avec un TDAH âgés entre 6 et 12 ans, le score d'une sous-échelle mesurant l'opposition et l'agressivité a été corrélée négativement aux scores dans des tâches mesurant les capacités de ToM (Levi-Shachar et al., 2021). Bien que certaines études rapportent une performance similaire entre des individus TDAH et neurotypiques (NT) sur des tâches de ToM (Dyck et al., 2001; Yang et al., 2009), une méta analyse a montré que les individus TDAH présenteraient un déficit de ToM de taille d'effet moyenne, ce qui serait moins sévère que chez les individus autistes, mais plus que chez les individus NT (Bora & Pantelis, 2016). Ce résultat pourrait s'expliquer soit par la présence de traits autistiques dans la population TDAH, soit par les faibles fonctions exécutives caractéristiques du TDAH, comme une mémoire de travail plus courte ou de faibles capacités d'inhibition (Bora & Pantelis, 2016; Taylor et al., 2013). Une investigation plus profonde serait nécessaire pour pouvoir se prononcer sur la cause de ces déficits. Le fonctionnement social a aussi été étudié dans l'anxiété, un autre trouble communément associé au TSA.

Troubles anxieux

Les personnes présentant un trouble anxieux ont fréquemment des inquiétudes et des pensées intenses, excessives et persistantes à propos de situations de la vie de tous les jours, incluant des épisodes répétés d'anxiété intense et de peur et de terreur qui atteignent un sommet en quelques minutes (appelés crises de panique ; APA, 2013). Les symptômes anxieux peuvent amplifier le dysfonctionnement social d'une personne (Chang et al., 2012 ; Factor et al., 2017) par l'« hypermentalisation » (Washburn et al., 2016). En effet, les personnes anxieuses tendent à attribuer des états mentaux complexes à autrui et à leur accorder une importance particulièrement grande dans leur processus de décision lors d'interactions sociales. Ainsi, les décisions sont parfois « trop » réfléchies, ce qui peut être inadapté. Cela a été observé surtout chez les femmes et particulièrement dans un contexte incluant une référence à soi, comme les interactions sociales (Ballespí et al., 2019). Ce dysfonctionnement serait cependant moindre que chez les individus TSA (Hezel & McNally, 2014). Il peut être difficile de déterminer si les altérations du comportement social sont dues au TSA ou au TA. De plus, les pensées anxieuses peuvent amplifier les comportements restreints et stéréotypés des personnes autistes, ce qui peut nuire aux interventions mises en place. Plus précisément, la littérature a montré que les individus avec un TA présentent une altération des capacités de mentalisation (Frith et al., 1994; Washburn et al., 2016), notamment dans la compréhension des signaux issus du regard (Baron-Cohen et al., 2001). Tout comme les

individus TDAH, les individus anxieux performant moins bien que les individus NT, mais mieux que les individus TSA, dans une tâche d'évaluation de la ToM (Dyck et al., 2001).

Approche catégorielle versus dimensionnelle

Ainsi, il est possible de conclure qu'autant le TSA que le TDAH et le TA sont associés à des difficultés variables au niveau du fonctionnement social. Cependant, selon les critères diagnostiques, la réciprocité sociale atypique n'est censée être caractéristique que du TSA. Pourtant, la littérature actuelle ne permet pas de distinguer systématiquement les atteintes associées aux différentes pathologies. Cela devient alors plus difficile d'affirmer avec certitude que le fonctionnement social atypique provient d'un processus propre au TSA. La littérature actuelle a souvent comparé des groupes de personnes autistes avec des personnes non-autistes pour tenter de mieux comprendre les déficits de réciprocités sociale. Cette approche, analogue à celle du DSM-5, est une approche dite catégorielle. Cependant, cette catégorisation pourrait potentiellement constituer une limite à la compréhension de l'étiologie des difficultés sociales (Amaral et al., 2019). Comparer des individus autistes avec ceux ayant un diagnostic de TDAH ou de TA est une façon intéressante de tenter de répondre à cette question. Il est aussi possible que les habiletés sociales hors normes du TA ou TDAH soient une forme atténuée de celles du TSA. Une approche alternative, dite dimensionnelle, sera aussi testée dans ce projet, considérant les symptômes des différentes pathologies comme des dimensions et en étudiant les associations entre ceux-ci pour tenter d'expliquer les déficits de réciprocité sociale.

L'évaluation des capacités de réciprocités sociales est sous-tendue, entres autres, par l'évaluation de la ToM dans la littérature (Fitzpatrick et al., 2018). Cependant, la communauté scientifique ne semble pas disposer d'un outil exhaustif qui évaluerait la ToM en prenant en compte à la fois ses aspects développementaux et multidimensionnels (ToM cognitive, ToM affective,...; Fu et al., 2023). Cela pourrait expliquer les résultats divergents de la littérature en ce qui à trait les fonctions cognitives et les zones cérébrales impliquées à travers les différentes tâches (Martins-Junior et al., 2011).

Mesures de la réciprocité sociale

Bien que les déficits de réciprocité sociale sont bien documentés chez les individus autistes et font partis des critères diagnostiques (Girli & Tekin, 2010), certains résultats, particulièrement lorsqu'on évalue la réciprocité à travers des mesures de ToM, se contredisent et cela pourrait être

dû, entre autres, aux limites des outils utilisés (Charman & Campbell, 1997 ; Grant et al., 2001 ; Mayes et al., 1996). En effet, bien que la réciprocité sociale et la ToM sont deux concepts théoriquement différents, un survol de la littérature a permis d'observer que les tâches de ToM sont souvent utilisées comme corrélats sous-tendant les capacités de réciprocité sociale chez les personnes autistes. Il est donc pertinent de relever ces limites et d'explorer la possibilité d'utiliser de nouveaux outils qui pallieraient les lacunes relevées. Mais d'abord, une description sommaire de ces outils s'avère utile pour comprendre ces limites. Les outils typiquement utilisés pour l'évaluation (quantification et qualification) des capacités de réciprocité sociale sont les questionnaires cliniques standardisés, les outils diagnostiques et les tâches comportementales.

Questionnaires cliniques standardisés

Les questionnaires cliniques standardisés sont couramment utilisés pour recueillir des observations rapportées soit par la personne elle-même, soit par ses proches. De ce fait, nous les appelons aussi des questionnaires auto-rapportés. Dans un contexte clinique, ce type de questionnaire, comme le *Social Communication Questionnaire* (SCQ), la *Social Responsiveness Scale* (SRS) et l'*Autism-Spectrum Quotient* (AQ), sont surtout utilisés à des fins de dépistage (Chesnut et al., 2017; Fekar Gharamaleki et al., 2021). Leur objectif est de quantifier les variations de réciprocité sociale.

Le SCQ est un questionnaire standardisé, rempli par les parents ou tuteurs légaux de l'enfant, composé de 40 items qui ont pour but d'évaluer le fonctionnement social et les capacités de communication de l'individu. Quelques exemples d'items sont : « Pouvez-vous avoir avec lui/elle une conversation qui implique que chacun parle à son tour ou une conversation construite à partir ce que vous avez dit ? »; « Vous semble-t-il que ses expressions faciales ont été habituellement appropriées aux situations spécifiques ? » (Rutter et al., 2003). Le SCQ a une sensibilité de 0,86 et une spécificité de 0,78 (Chandler et al., 2007). La SRS (version parent), un questionnaire standardisé évaluant la réciprocité sociale chez les enfants âgés de quatre à 18 ans, est composé de 65 items et doit être rempli par un parent ou tuteur légal (Constantino et Gruber, 2005). Cette échelle est particulièrement utile pour détecter des symptômes autistiques plus légers sous-cliniques, c'est-à-dire qui se situent entre la limite de la distribution normale et le niveau de préoccupation clinique. Le score de la SRS permet de quantifier la sévérité des traits autistiques et des symptômes, avec un score élevé indiquant un fonctionnement social très altéré (Hus et al., 2013). Les qualités psychométriques de la SRS sont satisfaisantes avec une validité discriminante

de 0,85 et une fiabilité (α de Cronbach) de 0,97 dans un échantillon clinique (Bölte et al., 2008). L'AQ est un questionnaire auto-rapporté qui a pour but de déterminer dans quelle mesure un adulte avec quotient intellectuel (QI) normal peut présenter des traits autistiques (Baron-Cohen et al., 2001). Ce questionnaire évalue différents sous-aspects (habiletés sociales, flexibilité attentionnelle, attention aux détails, communication et imagination) et un score élevé signifie que la personne aurait des habiletés faibles dans le sous-aspect au score élevé (Baron-Cohen et al., 2001). L'AQ présente une sensibilité de 0,45 et une spécificité de 0,52 (Conner et al., 2019). Ces questionnaires de dépistage sont la première étape lorsqu'un TSA est suspecté chez un individu. Si le dépistage est positif, l'étape suivante est l'évaluation diagnostique.

Outils diagnostiques

Une évaluation diagnostique inclut généralement une entrevue auprès des parents sur l'histoire développementale de l'enfant et ses habiletés et comportements actuels avec un rapport provenant du milieu éducatif lorsque c'est possible. Par la suite, une évaluation observationnelle est menée par le clinicien, ce qui peut inclure un examen médical, une évaluation développementale, cognitive et un échantillonnage des comportements sociaux. Il peut parfois être pertinent d'observer l'enfant dans son milieu écologique (p. ex., en classe). Finalement, les informations récoltées sont intégrées et un diagnostic est formulé et communiqué au parent avec des recommandations pour la prise en charge du trouble (Huerta & Lord, 2012). Un des outils couramment utilisés lors de l'échantillonnage comportemental est l'*Autism Diagnostic Observation Schedule* (ADOS) : une situation de jeu semi-structurée entre le clinicien et l'enfant suivant un protocole standardisé qui permet d'identifier des comportements (ou l'absence de comportements) qui sont liés aux critères diagnostics du TSA (Lord et al., 2000). Il existe cinq modules qui contiennent des activités différentes selon le niveau de langage et l'âge chronologique de l'enfant (Luyster et al., 2009). Afin d'augmenter l'accord inter juge (la proportion de cliniciens qui arrivent à la même cotation, basé sur une même évaluation), l'ADOS est souvent effectuée de manière multidisciplinaire (p. ex., un psychoéducateur effectue l'évaluation et un psychiatre observe, puis les deux professionnels cotent l'ADOS et comparent leurs scores). Ainsi, le niveau de concordance entre la classification de l'ADOS et le diagnostic et la fiabilité inter évaluateur sont élevés (respectivement : concordance = 64-82%; kappa = 0,74-0,98; Lord et al., 2012; Zander et al., 2016). Comme mentionné plus haut, une évaluation diagnostique exhaustive inclut une analyse de l'histoire développementale du patient. Pour ce faire, un outil diagnostique couramment utilisé dans l'évaluation de l'autisme est

l'*Autism Diagnostic Interview-Revised* (ADI-R; Lord et al., 1994). L'ADI-R consiste en une entrevue standardisée réalisée auprès des parents/tuteurs légaux de l'enfant qui visent à faire le bilan de trois domaines de fonctionnement : le langage et la communication, les interactions sociales réciproques et les comportements et intérêts restreints, répétitifs et stéréotypés (Rutter et al., 2003). Ainsi, à travers le deuxième domaine il est possible d'obtenir une mesure des capacités de réciprocité sociale de l'enfant. De plus, l'ADI-R possède de bonnes propriétés psychométriques avec une sensibilité de 0,94 et une spécificité de 0,80 (Lord et al., 1994; Randall et al., 2018). Les pratiques en matière d'évaluation diagnostique sont variables selon les contextes d'évaluation et les ressources disponibles, mais l'ADI-R, en combinaison avec l'ADOS, sont habituellement le *gold standard* de l'évaluation diagnostique du TSA et font parties des outils recommandés dans la littérature (Huerta & Lord, 2012).

Bref, ces outils, étant utilisés pour l'évaluation diagnostique, sont appropriés pour obtenir des mesures subjectives quantitatives et qualitatives des capacités de réciprocité sociale d'un enfant (Kim et al., 2013). Une autre modalité de l'évaluation de la réciprocité sociale existe sous la forme de tâches comportementales. Celles-ci sont surtout utilisées dans un contexte expérimental et elles ont pour but d'observer directement des composantes précises du fonctionnement social.

Tâches comportementales

Les tâches comportementales pour évaluer la réciprocité sociale sont surtout des tâches qui mesurent les capacités de mentalisation. Parmi les plus connues, nous retrouvons les tâches de fausses croyances qui exigent que le participant infère des états mentaux (pensées ou intentions) à des individus d'un point de vue à la troisième personne (c'est-à-dire que le participant agit en tant qu'observateur de l'interaction). Prenons l'exemple de la tâche de Sally et Anne (Leslie & Frith, 1988) où une courte histoire est expliquée oralement et avec l'aide d'un support visuel au participant (voir Figure 1). On explique d'abord que Sally cache un ballon dans un panier, puis sort de la pièce. Anne entre alors dans la pièce et change l'emplacement du ballon. Ensuite, Sally revient dans la pièce et on pose au participant la question suivante : « Où est-ce que Sally va regarder pour trouver le ballon ? ». Un participant avec des capacités de mentalisation dans la norme pour son âge développemental (s'il est âgé de plus de 48 mois) sera en mesure de se représenter les états mentaux de Sally et ainsi, comprendre qu'elle n'a pas vu Anne changer le ballon d'emplacement (Baron-Cohen et al., 1985). Ainsi, le participant répondra que Sally cherchera le ballon dans le

panier. En revanche, un participant qui ne possède pas des capacités de mentalisation en adéquation avec son âge développemental (s'il a plus de 48 mois) ne sera pas en mesure de se mettre à la place de Sally et répondra ainsi que cette dernière ira chercher le ballon dans la boîte. Ceci constituerait un échec à cette tâche de fausses croyances.

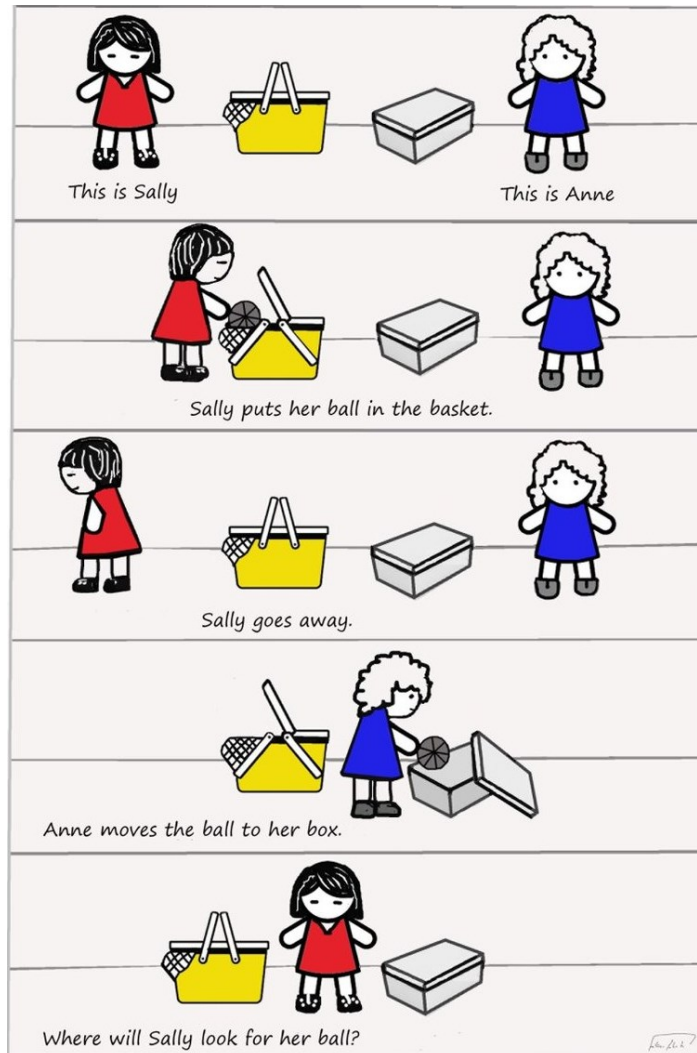


Figure 1. – La tâche de Sally et Anne (Felisberti & King, 2017)

Il existe plusieurs tâches similaires comme la *Smarties Task* (Wimmer & Perner, 1983), la *Comic Strip Task* (Sivaratnam et al., 2012) et la *John and Mary Task* (Perner & Wimmer, 1985). Cette dernière est une tâche de fausses croyances que l'on appelle de « second ordre ». Cela veut dire que l'inférence du participant doit se baser sur les inférences d'un des personnages par rapport aux états mentaux de l'autre personnage (p. ex., « John pense que Mary pense... »). Globalement, les tâches de fausses croyances visent à évaluer la ToM d'un individu en l'obligeant à utiliser ses

capacités de mentalisation pour répondre à une question ou résoudre un problème lors d'un changement dans un scénario de la vie de tous les jours. Une autre tâche populaire qui évalue les capacités socio-émotionnelles par l'attribution d'états mentaux sur la base d'indices sociaux est la *Reading the Mind in the Eyes Task* (Baron-Cohen et al., 2001). Dans cette tâche, le participant doit assigner des états émotionnels à une série de photographies montrant seulement des regards.

En somme, plusieurs outils existent pour évaluer la réciprocité sociale dans l'autisme, mais ils contiennent plusieurs limites qui peuvent potentiellement entraver les avancées dans la compréhension des atypies sociales observées dans le TSA.

Limites des outils classiques

D'abord, les questionnaires standardisés présentent généralement des limites au niveau de la subjectivité des réponses. Effectivement, les questionnaires, qu'ils soient auto-rapportés ou remplis par le parent, sont souvent sujets aux biais des personnes les remplissant. Par exemple, puisque les parents ont un intérêt personnel dans le pronostic de leur enfant, ils peuvent avoir tendance à sous- ou surestimer les capacités de son enfant, selon le cas (Oliver et al., 2002). Également, il a été démontré que les qualités psychométriques des instruments décrits plus haut (SCQ et SRS) varient en fonction des caractéristiques de l'enfant et du statut socioéconomique de la famille, rendant ces instruments peu robustes à l'hétérogénéité socio-économique de la population générale (Moody et al., 2017).

Dans les outils diagnostiques, la subjectivité du clinicien, l'observation courte et ponctuelle et le contexte artificiel dans lequel les évaluations ont lieu peuvent biaiser les résultats et réduire la validité écologique (Frigaux et al., 2019). Par exemple, il n'est pas permis de prendre en considération des comportements observés en dehors de la passation de l'ADOS lors de sa cotation. Donc, si un enfant a répondu à l'appel de son prénom (un des comportements évalués pendant l'ADOS) en dehors du moment de la passation de l'ADOS, mais qu'il ne l'a pas fait pendant celle-ci, il faudra considérer que l'enfant ne sait pas répondre à l'appel de son prénom lors de classification diagnostique. Le niveau verbal peut aussi grandement influencer la cotation des outils diagnostique, notamment pour l'ADI-R. Effectivement, 25% des items de l'ADI-R ne s'appliquent pas aux enfants non verbaux (Gotham et al., 2009). Cela biaise donc le résultat des outils.

Les tâches comportementales sont celles qui ont offert le plus de résultats contradictoires, potentiellement parce qu'elles évaluent la ToM de manière passive (le participant est un observateur

de l'interaction sociale). Les études initiales utilisant ce type de tâche ont trouvé que les personnes autistes avaient une performance inférieure aux personnes neurotypiques, motivant la communauté scientifique à voir la ToM comme un corrélat valide des capacités de réciprocité sociales (Baron-Cohen, 1989; Leslie & Frith, 1988). Cependant, l'accumulation des évidences scientifique nous montre aujourd'hui que les personnes autistes peuvent réussir des tâches de fausses croyances, bien que les difficultés seraient peut-être plus prononcées dans les tâches de second ordre (Eigsti & Irvine, 2021; Happé, 1995; Luckett et al., 2002; Prior et al., 1990; Sally & Hill, 2006). De plus, la fiabilité test-retest de ces tâches a été remise en doute en plus de présenter un effet plafond chez les adolescents (Mayes et al., 1996; Valle et al., 2015). Cela remet en doute l'utilisation de tâches de fausses croyances comme corrélat robuste des capacités de réciprocité sociale chez les enfants de tout âge. De plus, bien que les participants NT montrent généralement une meilleure performance que les participants autistes dans la tâche *Reading the Mind in the Eyes* (Baron-Cohen et al., 2001; Johnson et al., 2022), des exceptions existent dans la littérature (Cross et al., 2022). Les difficultés observées lors de cette tâche sont également présentes dans d'autres troubles psychiatriques que le TSA (p. ex., la schizophrénie, la bipolarité, le trouble psychotique), il serait donc simpliste d'assumer que les déficits de réciprocité socio émotionnelle dans cette tâche sont dus uniquement à l'autisme. Par exemple, ils pourraient être causés par les symptômes de l'Alexithymie, condition définie par une apathie émotionnelle. Une récente étude a montré que la présence du diagnostic de TSA n'avait pas d'impact significatif sur la performance à la *Reading the Mind in the Eyes Task*, tandis la présence du diagnostic d'Alexithymie, oui (Oakley et al., 2016). D'ailleurs, la validité de ce test a également été remise en question (Higgins et al., 2023).

Bref, une nouvelle tâche mettant l'individu dans un rôle actif et offrant une situation d'interaction sociale plus écologique pourrait contribuer à rendre l'évaluation de la réciprocité sociale plus valide (Rusch et al., 2020). Plus précisément, un outil qui n'est pas influencé par la subjectivité des parents, de l'enfant ou du clinicien, qui ne consiste pas qu'en une seule observation ponctuelle, qui est plus écologiquement valide et qui met la personne évaluée dans un contexte interactif, plutôt que passif, pourrait potentiellement pallier les limites relevées. D'autres types de tâches, qui n'ont pas été mentionnées jusqu'ici, pourraient présenter une avenue intéressante pour répondre à ces lacunes.

Jeux d'interaction

Dans cet ordre d'idées, nous proposons les jeux d'interaction comme alternative pour évaluer la réciprocité socio-émotionnelle. Ce sont des jeux intégratifs simples à comprendre pouvant facilement imiter des contextes d'interactions sociales de la vie quotidienne. Dans la littérature antérieure, les jeux d'interaction ont déjà été utilisés en combinaison avec un cadre d'analyse Bayésien (Diaconescu et al., 2014; Sevgi et al., 2020). Une revue de la littérature a d'ailleurs montré que les jeux économiques et les paradigmes d'apprentissage par renforcement ont la capacité de modéliser une composante importante des interactions sociales : la contrôlabilité sociale (Na et al., 2023). Cependant, ces études étudient des populations qui sont saines. Il serait intéressant d'explorer comment ces jeux d'interaction peuvent être utilisés pour décomposer le comportement social auprès de populations caractérisées par des atypies de communication sociale comme le TSA. Entre autres, le *Stag Hunt Game* se prête particulièrement bien à cet objectif.

Stag Hunt game

Le *Stag Hunt game* (SHG) est un jeu informatisé coopératif (deux joueurs) issu de la théorie des jeux. L'objectif sous-tendant ce jeu est d'illustrer le contrat social de Jean-Jacques Rousseau. Dans les faits, le participant doit chasser un cerf (ou tout autre cible) et peut choisir de le faire de manière coopérative ou solitaire (Skyrms, 2003). S'il choisit de le faire de manière coopérative, il a le potentiel de gagner une plus grande somme d'argent que s'il choisit de le chasser seul (Craig et al., 2017). Cependant, il court ainsi le risque de perdre toute la somme d'argent si son partenaire/adversaire n'a pas choisi de chasser le cerf avec lui. Le SHG tente ainsi de représenter le conflit entre la sécurité et la coopération sociale (Skyrms, 2003). Une étude utilisant le SHG a montré que la coopération était moins élevée dans une population autiste que dans une population NT et que les personnes autistes comprennent plus difficilement les intentions de leur adversaire, les empêchant d'anticiper correctement le choix de chasse (coopératif ou solitaire) de l'autre et par le fait même, les empêchant de maximiser leur gain (Craig et al., 2017). Dans ce jeu, une étude a trouvé que la performance d'adultes autistes était significativement moins motivée par l'attribution d'états mentaux que chez des adultes NT (Yoshida et al., 2010). De manière plus générale, le SHG est un jeu approprié pour décomposer de manière computationnelle le comportement d'adultes en contexte d'interaction sociale (Kishida et al., 2012). Cependant, il existe d'autres types de jeux d'interaction qui seraient potentiellement plus appropriés pour étudier une population pédiatrique.

Penny-hiding game (jeu de la pièce cachée)

Les jeux d'interaction peuvent aussi se baser sur des principes plus ludiques que le SHG et ainsi, être plus engageants pour des populations pédiatriques. Plus précisément, nous proposons le jeu de la pièce cachée ou *Penny-hiding game* (PHG) comme nouvelle mesure de la réciprocité sociale. Ce jeu, plus naturaliste et accessible aux personnes non verbales, demande à l'individu qui y joue de deviner dans laquelle de ses deux mains son adversaire a caché une pièce de monnaie (Gratch, 1964). Ce jeu a déjà été testé, avec succès, auprès de personnes autistes et NT pour évaluer les capacités de mentalisation (Cáceres et al., 2014). Les comportements observés lors du jeu incluaient la manière dont les individus cachent la pièce et les types de subterfuges (garder les deux mains vides, augmenter l'attention sur la mauvaise main, ...) utilisés pour battre l'adversaire. Ces comportements ont été utilisés dans des études antérieures pour qualifier les capacités de mentalisation des joueurs (Aljunied & Frederickson, 2011; Cáceres et al., 2014; Hamilton et al., 2007). De plus, un plus grand nombre d'erreurs (p. ex., garder ses mains ouvertes, utiliser une seule main, montrer à son adversaire où est cachée la pièce) et la faible utilisation de subterfuges pour tromper son adversaire ont été associés à de faibles compétences sociales telles que mesurées par la Vineland Adaptive Behavior Scales chez des personnes autistes (VABS; Cáceres et al., 2014; Oswald & Ollendick, 1989; Sparrow & Cicchetti, 1989).

Cette tâche semble donc être un bon outil pour mesurer la réciprocité sociale en étant simple, accessible à des enfants, ne nécessitant pas de langage verbal et en étant associé avec d'autres mesures du comportement social. Cependant, les comportements observés ne sont pas systématiques (n'arrivent pas nécessairement à chaque essai) et ainsi, manquent de robustesse.

Phénotypage computationnel de la réciprocité sociale

S'il est intéressant d'observer les comportements et réponses de la personne évaluée au cours de quelques essais du jeu, une version informatisée du jeu de PHG permet d'implémenter des dizaines d'itérations et ainsi, d'opérationnaliser la réciprocité sociale par des mesures quantitatives du comportement (voir Figure 2).

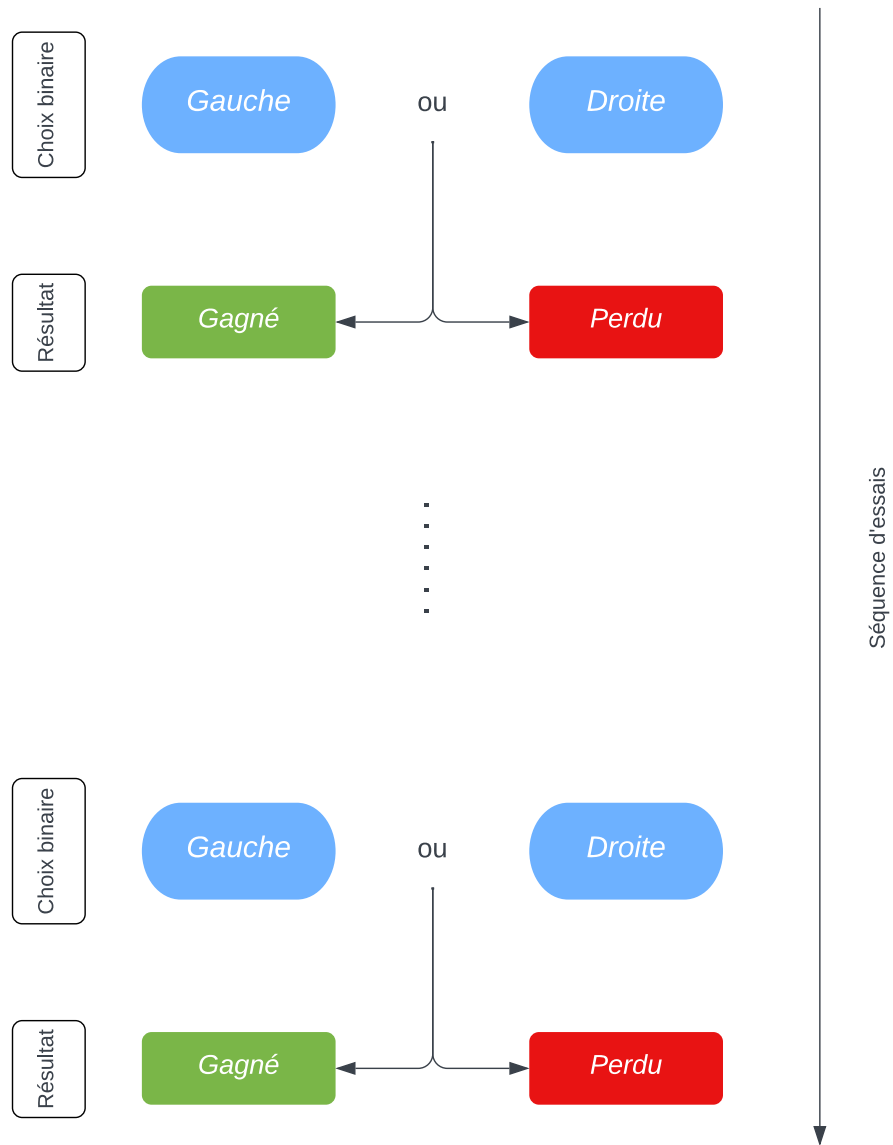


Figure 2. – La tâche informatisée du PHG

En étudiant la séquence de choix des participants et ainsi, les croyances qui se forment concernant l’adversaire et comment ces croyances influencent la manière subséquente de jouer, il est possible d’investiguer l’échange dynamique caractéristique de la réciprocité sociale et ce, de manière objective. Peu d’outils, à ce jour, ont été développés pour distinguer les différentes composantes de la réciprocité sociale de manière quantifiable. Le PHG informatisé est donc un paradigme qui pourrait combler ces lacunes en plus d’avoir le potentiel d’aider à suivre l’évolution des symptômes.

Grâce aux avancées des outils d'analyse dans le domaine de la psychiatrie computationnelle, notre équipe de recherche a pu tester ce paradigme auprès de plusieurs populations (Devaine et al., 2014a, 2017 ; Forgeot d'Arc et al., 2020). Dans notre version informatisée de la tâche du PHG, les joueurs devaient affronter des « adversaires humains » en ligne. Ces derniers étaient, en fait, des algorithmes possédant différents niveaux de mentalisation. Le choix des « adversaires » (qu'on appellera désormais « agents ») repose, dépendamment du niveau de mentalisation (ToM), sur le choix du participant et les résultats antérieurs dans une séquence d'essais de la tâche. Les stratégies utilisées par les joueurs est donc représentée dans l'algorithme des agents par une variable, ce qui signifie que ces derniers ont des capacités méta représentatives, en ce sens qu'elles attribuent des états mentaux. Spécifiquement, c'est le cas pour les agents k -ToM où $k = 0, 1$ et 2 . D'autres algorithmes ont également été utilisés dans la tâche, soit un algorithme qui joue de manière aléatoire (RB ou *Random Biased*) ou qui suit une simple séquence (Seq-A, B ou C). Les algorithmes des agents peuvent avoir différents niveaux de « sophistication », soit la profondeur de la récursivité des états mentaux attribués. Ainsi, un agent utilisant un algorithme sophistiqué de niveau 1 (1-ToM) inférera l'état mental du joueur pour faire son choix dans la tâche à un essai donné. Un agent 2-ToM inférera non seulement l'état mental du joueur, mais aussi ses croyances à propos de ses propres états mentaux (« il pense que je pense... ») pour faire son choix. En utilisant des algorithmes avec différents niveaux de ToM, le but est également de déterminer le niveau de sophistication des stratégies des joueurs. En effet, un agent plus sophistiqué l'emportera contre un agent moins sophistiqué selon des simulations (Devaine et al., 2014b). Ainsi, en contrôlant le niveau de sophistication des agents (adversaires) en utilisant des algorithmes plutôt que des adversaires humains en ligne, il est possible de conclure que la sophistication d'un joueur serait, par exemple, supérieure à 1 si ce joueur arrive à battre un agent 1-ToM. Cette logique repose sur le principe probabiliste bayésien qui sous-tend l'hypothèse du cerveau social bayésien (Palmer et al., 2017). Ce principe stipule que, dans un contexte social, un être humain se servira des indices qu'il observe (le comportement verbal et non-verbal de son interlocuteur, les changements dans l'environnement) pour mettre à jour ses croyances sur lui-même et sur son interlocuteur. Il effectue, en quelque sorte, un calcul de probabilité en utilisant une règle de décision Bayésienne (Joyce, 2019). Plus simplement, en prenant en compte à la fois ses connaissances préalables et les nouvelles informations qu'il acquiert au fil de l'interaction, l'être humain estime la probabilité de réalisation d'un événement subséquent (Devaine et al., 2014a).

Phénotypage computationnel de la population adulte neurotypique

Le paradigme expérimental expliqué dans la dernière section a d'abord été testé avec une population adulte neurotypique dans une étude de Devaine, Daunizeau et Hollard (2014a). Concrètement, les participants devaient effectuer la tâche du PHG informatisée sur plusieurs blocs de quarante essais contre un ordinateur présenté soit comme un joueur en ligne, soit comme une simple machine à sous (contexte social et contexte non-social). Il est important de comprendre que dans le contexte dit « social », il est spécifié explicitement aux joueurs qu'ils jouent contre un adversaire *humain* en ligne (bien qu'en réalité, ils jouent contre des algorithmes). Le succès de cette duperie a été confirmée à deux reprises (Devaine et al., 2014a; Forgeot d'Arc et al., 2020). Comme expliqué plus haut, les adversaires agissaient selon des algorithmes ayant différents niveaux de sophistication (RB, 0-ToM, 1-ToM ou 2-ToM). Les résultats de cette étude ont montré des différences de mentalisation en fonction du contexte (social ou non). Les participants NT adultes étaient significativement ($p < 0.01$) plus performants lorsqu'ils pensaient jouer contre un adversaire en ligne (contexte social). Dans le contexte social, il a été montré que les participants gagnaient en général contre des adversaires aux capacités de mentalisation plus élevées (ToM-1, ToM-2) alors que dans le contexte non-social, ils étaient moins performants contre ces mêmes adversaires. Cela suggère un effet différentiel du contexte. De plus, la performance des participants diminuait significativement lorsque la sophistication des adversaires augmentait, ce qui a amené une preuve empirique des résultats de simulations rapportés précédemment (Devaine et al., 2014b).

Phénotypage computationnel de la population adulte TSA

La tâche a par la suite été testée chez une population adulte autiste en comparaison avec des adultes NT en utilisant la même interface et les mêmes types d'adversaires que dans la première étude (Devaine et al., 2014a; Forgeot d'Arc et al., 2020). Les participants ont effectué quatre blocs de 40 essais dans chaque contexte. Des analyses de performance (% d'essais gagnés) et des analyses computationnelles ont été effectuées.

Les analyses computationnelles utilisent la séquence de choix des essais comme données d'entrée pour un type d'analyse nommé *Model Inversion*. Dans le *Model Inversion*, des modèles mathématiques sont utilisés pour représenter les stratégies d'apprentissage des joueurs (Daunizeau et al., 2014). Celles-ci se développent en fonction du *feedback* reçu à la fin de chaque essai. Le *Model Inversion* utilise des théorèmes mathématiques comme l'approche variationnelle Laplace et

l'approximation de champs moyens (Daunizeau, 2018) pour réduire la complexité des calculs à effectuer et ainsi, calculer les *Model Inversion* dans un délai raisonnable, ce qui n'était pas possible auparavant. Concrètement, les inversions comparent la séquence d'essais réels des joueurs à une banque de stratégies possibles, pour extraire une métrique qui quantifie l'adéquation entre chaque séquence d'essais réelle et la stratégie potentielle. Neuf stratégies candidates ont été choisies pour représenter des façons potentielles de jouer. D'abord, nous avons les modèles *k-ToM*, où *k* reflète le niveau de profondeur des croyances récursives du joueur à propos de son adversaire (Devaine et al., 2014b). Concrètement, le modèle 0-ToM n'attribue pas d'états mentaux à son adversaire, mais estime la tendance de choix de son adversaire en suivant son comportement observable. Le modèle 1-ToM suppose que son adversaire est un agent 0-ToM et infère ses états mentaux pour pouvoir faire le bon choix pour gagner le jeu. Le modèle 2-ToM suppose que son adversaire est un agent 1-ToM ou 0-ToM et infère les règles d'apprentissage de chacun de ces modèles pour pouvoir prendre une décision qui résultera en une victoire. Ensuite, nous avons des modèles qui n'infèrent pas d'états mentaux propres à l'adversaire, mais qui établissent une règle d'apprentissage. Le modèle d'apprentissage par influence (Hampton et al., 2008) adopte une règle d'apprentissage similaire à un agent 0-ToM pour déterminer comment ses propres actions influencent le comportement de son adversaire, sans pour autant faire de réelles inférences sur les états mentaux de ce dernier. Le modèle volatile bayésien est lui aussi une extension du modèle 0-ToM avec une capacité additionnelle à ajuster sa vitesse d'apprentissage au cours des essais. Nous avons également la stratégie d'apprentissage par renforcement qui utilise un principe comportemental pour ajuster le poids d'un choix par rapport à l'autre en fonction du succès des essais précédents. Finalement, nous avons les stratégies plus triviales qui n'ont pas de règles d'apprentissage : gagne-reste ; perd-change et aléatoire, qui s'expliquent d'eux-mêmes par leur nom. Des scores sont attribués à chacun de ces modèles lors du processus d'inversion, reflétant le niveau d'adéquation entre ce que le modèle prédit et ce que le joueur a réellement fait pour chaque bloc d'essais. Par la suite, il est possible d'extraire de ces scores le phénotype computationnel des participants, des indices représentant deux aspects du comportement observable : la sophistication et la flexibilité. La sophistication est la profondeur des croyances récursives (selon la logique : « je pense que tu penses que je pense... etc. »), tandis que la flexibilité est le taux de changement de stratégies (Forgeot d'Arc et al., 2020). La Figure 3 illustre la séquence d'essais et les analyses effectuées dans l'étude de Forgeot d'Arc, Daunizeau et Devaine (2020).

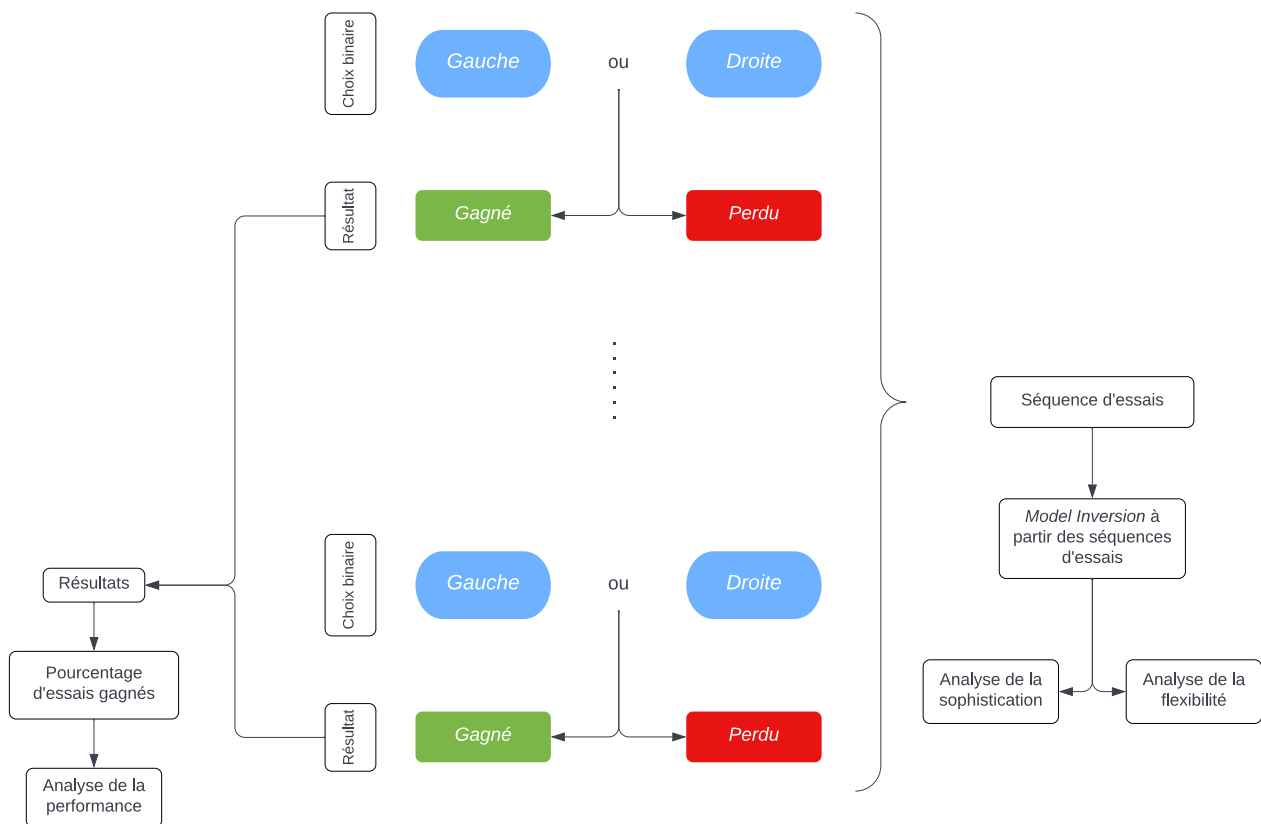


Figure 3. – Illustration de la tâche informatisée et décomposition de l’analyse computationnelle

Cette étude a montré que les adultes NT ont une meilleure performance que les adultes autistes lorsqu’ils pensaient jouer contre un adversaire humain. Dans ce contexte social, les participants autistes ont aussi montré une flexibilité et une sophistication plus faible, tout en adoptant majoritairement la stratégie d’apprentissage par influence (Hampton et al., 2008). Finalement, ces deux phénotypes computationnels ont permis de fournir une classification diagnostique précise à 79 % et expliquaient 62 % de la variance dans la mesure de la sévérité des symptômes sociaux des participants autistes. Ceci était équivalent à la validité de l’ADOS (Lord et al., 2000), tout en étant économique en termes de temps nécessaire par rapport à la passation et la cotation d’une ADOS.

Objectifs et hypothèses

Le but du présent projet est donc d’étendre cette compréhension de la réciprocité sociale obtenue chez l’adulte autiste à une population pédiatrique âgée de 6 à 18 ans ayant un diagnostic de TSA, de TDAH et/ou de TA, en comparaison avec des enfants NT. C’est là que réside la nouveauté du

projet. De plus, nous voulons mettre de l'avant la pertinence de l'utilisation d'une tâche expérimentale interactive comme mesure de réciprocité sociale et d'une approche computationnelle pour potentiellement différencier les pathologies qui ont des symptômes en communs. Concrètement, il y aura deux volets à nos analyses : catégoriel et dimensionnel (voir Figure 4).

1. **Approche catégorielle** : comparer les groupes pour déterminer s'il y a des différences au niveau de la performance, des modèles d'apprentissage et du phénotype computationnel. Les hypothèses sont basées sur les travaux précédents et tentent de déterminer si les résultats peuvent se répliquer d'une population à l'autre (Devaine et al., 2014a; Forgeot d'Arc et al., 2020)
 - a. Groupe TSA : Le niveau de sophistication (en contexte social) et de flexibilité sera significativement plus faible que le groupe NT ; le modèle d'apprentissage par influence sera le plus prévalent.
 - b. Groupe TDAH : la performance sera plus faible que le groupe NT.
 - c. Groupe TA : la performance sera plus faible que le groupe NT; la sophistication sera significativement plus haute que le groupe TSA.
 - d. Groupe NT : Il y aura une différence significative de performance entre le contexte social et non-social; la sophistication (en contexte social) et la flexibilité seront significativement plus grandes que le groupe TSA.
2. **Approche dimensionnelle** : étudier les associations entre les symptômes des différents troubles ou la sévérité de ceux-ci et le phénotype computationnel et la performance. Cette approche étant nouvelle dans le cadre de ce type de tâche et de technique d'analyse, cet objectif sera considéré comme exploratoire et ainsi, aucune hypothèse n'est posée.

À noter qu'un paramètre d'alternance/persévérance a été ajouté à la suite de l'inspection visuelle des séquences de choix des participants et avant l'analyse des résultats. Ce choix a été fait pour tenter d'augmenter la quantité de variance capturée par nos modèles. Le but était de calculer, en excluant l'utilisation des stratégies d'adaptation possibles, la proportion ou la tendance qu'avaient les enfants à jouer de manière automatique (soit en alternant leurs choix, soit en choisissant toujours

le même). Puisque ce paramètre a été ajouté *a posteriori*, il n'est pas mentionné dans l'introduction ni dans les hypothèses, mais est présent dans la Figure 4 ci-dessous. Les conclusions faites sur la base de ces résultats ne seront considérées qu'exploratoires.

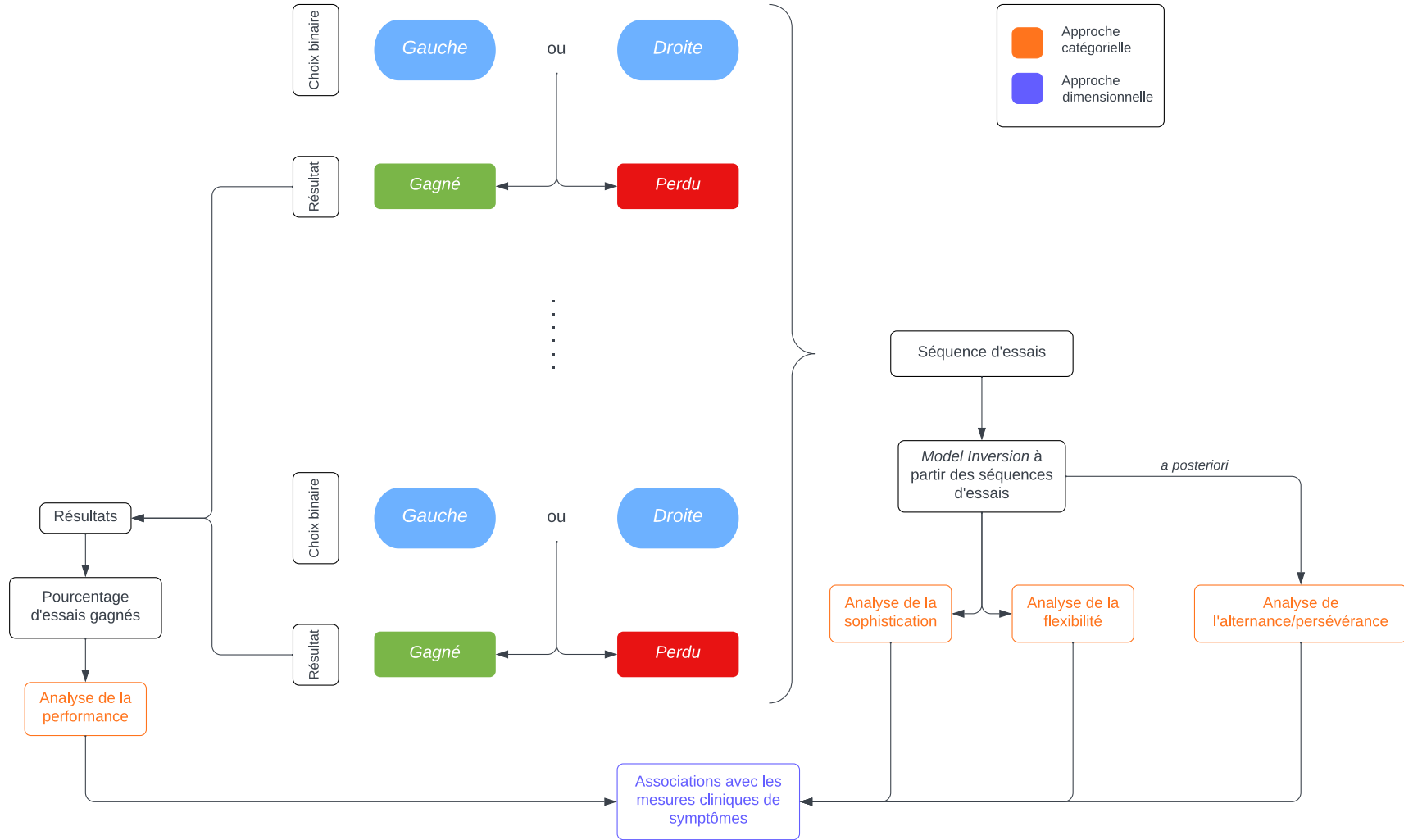


Figure 4. – Illustration essai par essai de la tâche informatisée décomposition des deux volets d'analyses

Article

A Penny for Your Thoughts: Computational Phenotyping of Social Reciprocity in Neurodevelopmental Disorders via a Variational Bayesian Model of the Penny-Hiding Game

Lisane MOSES^{1,3}, Quentin DUFRANNE², Pauline LIGONIE¹, Katelyn CASSAT^{1,4}, Theo BADRA⁴, Jean DAUNIZEAU^{6,7}, Baudouin FORGEOT D'ARC^{1,2} & Guillaume DUMAS^{1,2,5}

¹Research Center, CHU Sainte-Justine, Montréal, Québec, Canada.

²Department of Psychiatry and Addictology, University of Montréal, Québec, Canada.

³Department of Psychology, University of Montréal, Québec, Canada.

⁴Faculty of Medicine, University of Montreal, Québec, Canada

⁵Mila – Quebec AI Institute, University of Montreal, Québec, Canada

⁶INSERM / Paris Brain Institute (ICM), Paris, France

⁷Translational Neuromodelling Unit (TNU), ETH, Zurich, Switzerland.

Status: in preparation

Abstract

This paper investigates social reciprocity deficits in children with Autism Spectrum Disorder (ASD), Attention-Deficit with or without Hyperactivity Disorder (ADHD), Anxiety Disorder (AD), and neurotypical (NT) children using a novel interactive computerized game of the Penny-Hiding Game. The study explores computational phenotypes of social reciprocity, and their potential associations with symptoms and performance. We used Variational Bayesian Analysis to model the behavior of each individual during the task. Comorbidity, a significant factor in ASD research, is taken into account by including participants with co-occurring diagnoses. This research aims to bridge the gap between clinical reality and research by studying heterogeneous clinical populations. The paper hypothesizes lower sophistication and flexibility in the ASD group in the social framing of the game, as well as less sophisticated adaptation strategies. Our findings illuminate predominant use of the Reinforcement Learning strategy across groups, perseverance as a potential correlate for ASD, and significant associations between performance in the social framing and clinical symptoms. These insights will help advance personalized therapeutic interventions, underscoring the need for future exploration of computational processes at play during social interaction in neurodevelopmental disorders.

Keywords: Autism, Attention-Deficit with or without Hyperactivity Disorder, Anxiety Disorders, Social Reciprocity, Computational Psychiatry.

Introduction

Interacting with others is a fundamental aspect of what it means to be human. It is a multi-purpose, multi-faceted concept. To be able to interact *successfully* with others, a dynamical reciprocal adjustment must occur between the concerned parties. In the scientific literature, social reciprocity is defined as an individual's ability to flexibly engage in social interactions between two or more persons (Schwartz et al., 2021). It is thought to be impaired in social communication disorders such as Autism Spectrum Disorder (ASD; APA, 2013; Girli & Tekin 2010).

It has been suggested that Theory of Mind (ToM: the ability to attribute mental states to others; Premack & Woodruff, 1978) could be play a major role in an individual's capacity to engage in reciprocal interaction. Namely, inferring what is on a counterpart's mind might be a powerful way to anticipate their next action and adjust to it. However, the evidence of a link between altered reciprocity (as in autism) and an altered ToM remains controversial. Widely used in experimental settings, ToM tasks often take the form of false-belief or emotion attribution tasks, in which individuals are asked to infer mental states based on an external observation of a social stimulus (Baron-Cohen et al., 1985; Happé, 1995). Autistic individuals usually fail these tasks, but there have been new accounts showing that autistic individuals might only show deficits in “second-order” ToM tasks (Levi-Shachar et al., 2021). While this might be because autistic individuals compensate their potential lack of social reciprocity with explicit language, current ToM tasks cannot help verify this hypothesis as they are verbal tasks (Valle et al., 2015). Thus, the general consensus of the scientific community on social reciprocity alteration could be biased as it is mainly based on passive, third-person point of view tasks (Bora & Pantelis, 2016; Schilbach, 2016). Other tools used for quantifying or qualifying social reciprocity deficits do exist, such as self-report questionnaires or diagnostic tools (e.g., Social Responsiveness Scale or Autism Diagnostic Observation Schedule; Constantino et Gruber, 2005; Lord et al., 2000). But they also tend to be subjective and/or stem from a short amount of behavioral sampling, often in a non-naturalistic context (Frigaux et al., 2019; Oliver et al., 2002). Therefore, a new tool that would fill these gaps could help the scientific community understand ASD further and may help better establish its phenotype, known to be widely variable (Charman et al., 2011).

Concretely, a new task putting the individual in an active role and offering a more ecological socially interactive setting could help make the assessment of social reciprocity more valid (Rusch

et al., 2020). In a computational psychiatry and precision medicine framework, the behavior of each individual during such tasks could be modeled to computational models of adaptation strategies (Daunizeau et al., 2014; Devaine et al., 2014b). These could then be used to differentiate pathological from typical processes in a social interaction context. Previous literature has suggested that Bayesian theories could be useful in the screening and even diagnosis of ASD (Haker et al., 2016).

Here, we propose to combine a Variational Bayesian Analysis (VBA) framework and the use of an interactive, first-person social reciprocity task, namely the Penny-Hiding Game (PHG). The PHG has been used before, but not in children with ASD and their associated psychiatric conditions (Devaine et al., 2014a, 2017; Forgeot d'Arc et al., 2020). When used with autistic children, it didn't take into account the potential effect of comorbidity, and it wasn't used with computational methods (i.e., single behavioral trial; Cáceres et al., 2014). Comorbidity is a real issue that has to be considered in research samples, especially in the case of ASD as 30 to 50% of autistic children also present a psychiatric comorbidity like Attention-Deficit with or without Hyperactivity Disorder (ADHD) or Anxiety Disorder (AD; Simonoff et al., 2008). Associated conditions also have an impact on references for diagnosis and scores on diagnostic instruments. Therefore, in this study we wanted to test how autism, AD and ADHD influence behavioural adaptation in the PHG.

To go beyond the artificial simplicity supposedly homogeneous research samples and to try and bridge the gap between clinical reality and research, we will study multiple clinical populations that are comorbid (i.e., a participant in a group might also have the diagnosis of another group).

Thus, we asked this question: how does the computational phenotype of children with either ASD, ADHD, AD or neurotypical (NT) children differ between groups or in a non-social vs. social framing of a computerized interactive game? Additionally, we will explore the possible associations between symptoms and the performance and computational phenotypes extracted during the task. We hypothesize — based on previous work in adults (Forgeot d'Arc et al., 2020) — that sophistication will be lower in the ASD group in the social framing. We also expect flexibility to be lesser in the ASD group across framings. Additionally, we expect less sophisticated adaptation strategies in the ASD group as well as no qualitative change between framings in regard to their computational phenotype or performance.

Methods

Participants

In total, 126 children were recruited for this project. Data collection took place at the CHU Sainte-Justine in Montreal. Participants were recruited through multiple clinics, including psychiatry, diabetes, and dermatology clinics. Children were split into three clinical groups (ASD, ADHD, AD) and one control group (NT; see Table for descriptive statistics). For the NT participants, we aimed to recruit children who periodically frequented hospitals to match the reality of the clinical groups. A power analysis showed that for a $\alpha_{\text{critical}} = 0.05$ and a power of 0.77, 30 participants per group were needed. The inclusion criteria for the NT group were being exempt of psychiatric diagnoses and being between 6 and 18 years of age. Intellectual Disability was an exclusion criteria to ensure that participants understood the task. For the clinical groups, the inclusion criteria were the same except that children had to have at least one diagnosis of ASD, ADHD, or AD. We allowed comorbidities, given the high rate mentioned in the introduction and the objective to better reflect clinical reality. However, interpretation of the results will take this overlap into account.

Group	N	Age	Sex	% Com.
ASD	28	11.3 ± 3.3	04:24	64
ADHD	34	11.0 ± 2.9	09:25	0
AD	34	13.2 ± 2.8	10:24	65
NT	30	10.8 ± 3.5	12:18	0

Note. N: number of participants; Age (mean ± SD); Sex (n of girls : n of boys); Com: comorbidity.

Tableau 1. – Descriptive statistics

Ethics

This project was conducted in accordance with the Declaration of Helsinki and approved by the ethics committee of CHU Sainte-Justine’s Research Center (MP-21-2019-2215). All participants’ parents gave their free, informed consent, and assent from the child was obtained when possible.

Procedure

All potentially eligible participants were first screened through their medical files. If a potential participant fit the inclusion criteria, we contacted the parents. During the phone call, we presented the study and asked the parent if them and their child were interested in participating. If so, we set up a time before or after their next appointment, at their convenience, for the testing. At the time of the testing, we went through the consent form with the parent and their child and asked if they had any questions. At that point, if they were still interested, we made them sign the consent form and went ahead with the study.

The study was done at the CHU Sainte-Justine Research Center in Montreal, Canada. After we obtained consent, we explained the study's setup to the participants. First, we put the child in front of a computer with a touch screen and explained they would be playing two games (see Experimental Task for details). While the child completed the experiment, the parent filled out questionnaires on a CHADIS-inspired interactive platform on an iPad. A detailed description of these questionnaires can be found in the Clinical Measures section. The whole experimental protocol took from 30 minutes to an hour. After the experiment, we offered a symbolic gift of an approximate value of \$10 and reimbursed the parents' parking fees, whether or not they had completed the study.

Experimental Task

Our experimental task was hosted on the BrainUs platform, an online platform developed by Dr. Jean Daunizeau and his colleagues from the *Institut du Cerveau et de la Moelle épinière* (INSERM, Paris). We used 2 of the 8 games on BrainUs, namely “Hide and Seek” and “A Picky Chick”. These are similar computerized versions of the already validated PHG used in previous studies (Devaine et al., 2014a; Forgeot d’Arc et al., 2020). The stimuli were made more playful and adapted for children. The “Hide and Seek” and “A Picky Chick” games can be differentiated by the framing they put the player in. In the “Hide and Seek” game, which will be referred to as the social framing, the player was told that they were playing against an online human opponent. In the non-social framing (“A Picky Chick” game), the player was told that they played against a computer represented by the chick. The only difference between the two games was the instructions. In reality, the player was competing against algorithms, some of which had mentalizing abilities (Devaine et al., 2014; Forgeot d'Arc et al., 2020). Due to the psychological nature of mentalizing, one could argue that it is impossible to confirm the attribution of this concept to our algorithms.

However, the algorithms were able to keep “in mind” (i.e., it was represented by a variable in their strategy algorithm) the strategies that our participants used in previous trials. In this sense, the algorithms were thought to have a meta-representative quality (representing our participants' mental states), which correlates with mentalizing capacities. The participants played in a systematically the social, then non-social framing. The type, order, and number of algorithms the players were faced with were all pseudo-random and couldn't be changed manually. For each block, the opponent varied in the mentalizing capacities (included in their algorithm) it was endowed with. Here were the different types of algorithms:

RB or Random-Biased: the opponent played randomly with a 65% bias to one side.

k -ToM ($k = 0, 1, 2$): these opponents are all endowed with varying levels of ToM. 0-ToM estimates the frequency of responses from the participant and hides the coin where the participant is less likely to look for it. 1-ToM assumes its opponent is a 0-ToM agent, infers 0-ToM's learning rule and acts accordingly to beat it. 2-ToM represents its opponent as either 0 or 1-ToM and tries to determine the accurate level of sophistication to make the best subsequent choice.

Sequence: the opponent played according to a predefined sequence. On the BrainUs platform, there was no possibility of controlling the sequence types. Therefore, a mean score was computed for all three types of sequences programmed into the BrainUs games.

Social Framing (“Hide and Seek”)

During the experimental procedure, a research assistant explained the rules to the participant at the beginning of the social framing task. In a simple fashion, a trial consisted of the participant's binary choice on which of the two cups an online opponent had chosen to hide a coin (see Figure 5). Critically, there was no online opponent, despite saying so to the participant in order to mimic social interaction. There were 5 blocks of 40 trials, and the participant had 1500 ms to answer in each trial. Feedback was given after each trial, and the score out of 40 was displayed at the end of each block. Across the 5 trials, players faced a RB opponent, a 0, 1, and 2-ToM opponent, and one of the three Sequence opponents.

Non-social Framing (“A Picky Chick”)

For this game, the player was explicitly told they were not playing against another person, but rather against the computer. The participant was now facing a chicken that wanted to either eat wheat or carrot, and the instruction was that the player had to choose one of the two food items (see Figure 5). In reality, the participant was playing against the same algorithms as in the Hide-and-Seek game, though they were not told. Each player played four blocks of 40 trials with 1500 ms to make their choice. Feedback was given after each trial, and the score on 40 was displayed at the end of each block. Across the 4 trials, players faced a 0, 1, and 2-ToM opponent, as well as one of the three Sequence opponents or the RB opponent.

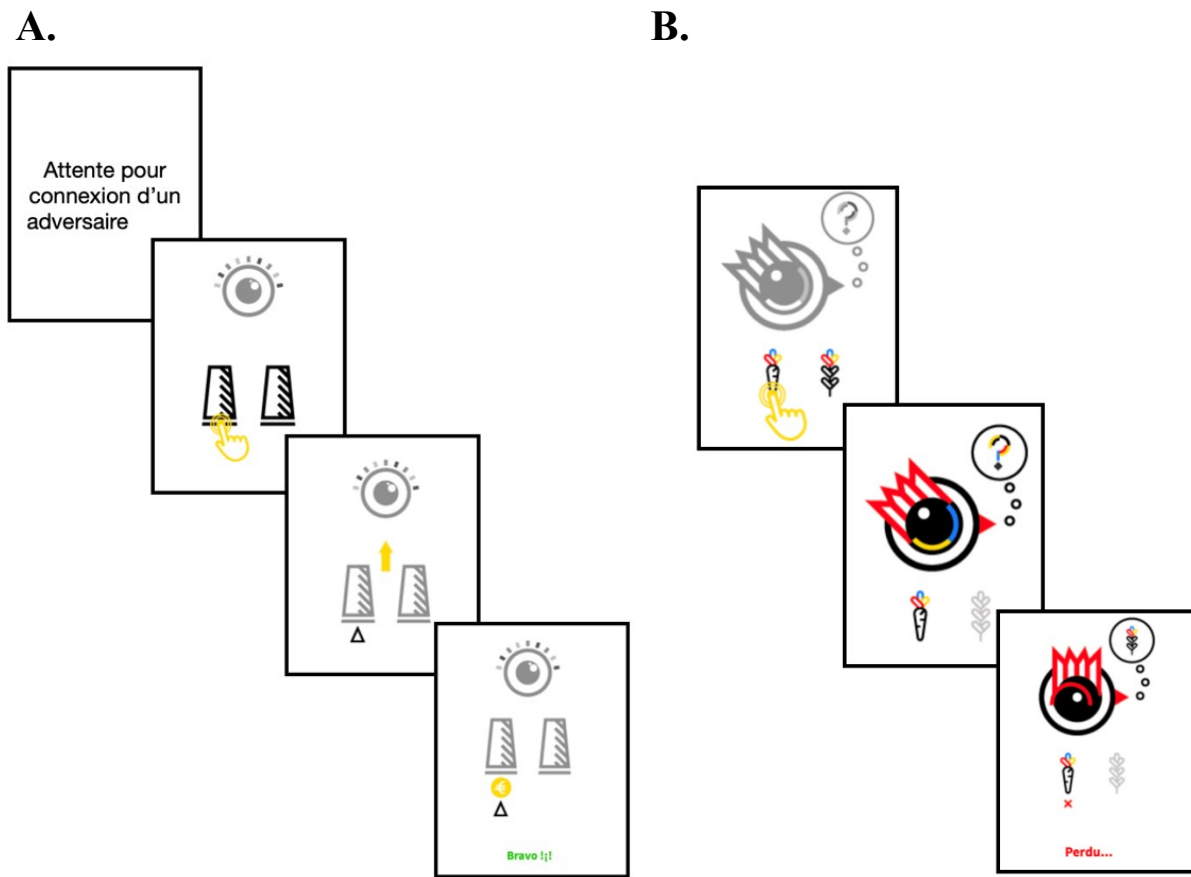


Figure 5. – Illustration of the stimuli of the PHG task and decomposition of a trial; (A) Social framing (“Hide and Seek”); (B) Non-social framing (“A Picky Chick”)

Clinical Measures

We had the parents fill out a variety of questionnaires that are often used in clinical settings to get a full picture of each participant's symptoms and range of behaviors. The parents filled out a total of five questionnaires. We selected two scores for each type of symptom: autistic, attentive/executive, and anxious.

Autistic Symptoms Measures

Total Score: SCQ (Social Communication Questionnaire; Lifespan version)

The SCQ is a questionnaire based on the ADI-R (Autism Diagnostic Interview—Revised; Lord et al., 1994) and aims at evaluating the social and communication functions of an individual (Rutter et al., 2003). The lifespan version we use is based on the developmental history of the child. A total SCQ score higher than 15 means the child is at risk for ASD.

Thought Problems and Social problems: CBCL/6-18 (Child Behavior Checklist for Ages 6-18)

The CBCL is a questionnaire from the ASEBA (The Achenbach System of Empirically Based Assessment, school module; Achenbach, 2015) that allows for the evaluation of behavioral and emotional problems and possible psychopathologies in children aged between 6 and 18 years old (Achenbach & Edelbrock, 1991). The subscales “Thought Problems” and “Social Problems” were used as they appear to be good indicators of autistic symptomatology severity (Duarte et al., 2003; Mazefsky et al., 2011; Volkmar, 2013).

ADHD Symptoms Measures

Conners 3 complete parent version

This questionnaire can be used during the diagnostic evaluation of an individual suspected of having ADHD and is suited for children aged 6 to 18 years of age. Specifically, we used the 3GI (Global Index) score for our analyses (Conners et al., 2011). This score is interpreted in terms of the risk of presenting ADHD. Thus, the higher the score, the higher the risk of presenting ADHD.

BRIEF (Behavior Rating of Executive Function)

This questionnaire is meant to quantify executive function deficits in children aged between 5 and 18 years old (Donders, 2002). We used the Global Executive Composite (GEC) which sums up all

the domains evaluated. We chose this measure because executive functions are thought to be impaired in ADHD and because it has high construct validity with our other ADHD measure, the Conners ($r = 0.70$ to 0.87 ; Kao & Thomas, 2010).

Anxious Symptoms Measures

Anxiety Problems: CBCL-6/18

We extracted another subscale from the CBCL (see Autistic Symptoms Measures for details) to evaluate anxiety symptomatology, precisely the “Anxiety Problems” subscale. It is a good detector of anxiety disorders in youth (Kendall et al., 2007).

SCARED (The Screen for Child Anxiety Related Emotional Disorders)

The SCARED is meant to evaluate the presence and intensity of symptoms associated with anxiety disorders (Birmaher et al., 1999). We used the total score of the SCARED which has a cutoff score indicating if the child is at risk or not of having an anxiety-related disorder. Research has previously demonstrated that this scale can effectively differentiate anxious from non-anxious individuals (DeSousa et al., 2013; Monga et al., 2000).

Global Symptomatology

Total Problems: CBCL-6/18

We used the "Total Problems" subscale from the CBCL (Achenbach, 2015) to measure the symptoms of our participants in a more general way. This score reflects the intensity of symptoms for each participant.

Differentiation of Groups

To make sure our sample accurately reflected the clinical stratification (i.e., that our clinical groups were different from each other and that the clinical groups differentiated from the NT group in terms of symptoms type and severity), we verified group differences for each of our clinical measures. On the SCQ, the ASD group was different from all the other groups, and the NT significantly differed from the AD group, but not from the ADHD group. On the “Thought Problems” subscale of the CBCL, only the AD group was significantly different from the ASD group amongst the clinical groups, and the NT group was significantly different from each clinical group. On the BRIEF, only the AD group was significantly different than the ASD group amongst

the clinical groups, and the NT group was significantly different from each clinical group. As for all the other measures, the clinical groups did not differ from each other, but the NT group was always significantly different from each clinical group.

Computational Modeling of Adaptation Strategies

Here, we will describe, from a more computational standpoint, the experimental task that was used and how we modeled our participant’s trial-by-trial choice sequence to derive adaptation strategies. Our experimental task is considered a repeated dyadic (two players) game, in which only two actions are available for each player: 1 (first option available) and 0 (second option available). A game is defined by its payoff table, which, in our competitive setup, simply consists of an anti-symmetric payoff table (see Table 2). According to Bayesian decision theory, agents will aim at maximizing the expected payoff, where the expectation is related to the agent’s uncertainty about her predictions about her opponent’s next move. Here, we considered that choices may exhibit small deviations from the rational decision rule (i.e., we assume agents employ a “softmax” probabilistic policy), which gives a certain volatility to the choices the players can make. This simply means that we allow a certain derivation from the mathematically logic choice to be made, since children do not consciously compute all the information given by a trial-by-trial choice sequence. This is taken from Forgeot d’Arc et al. (2020), as we used the same theoretical grounds and analytical tools to establish the repertoire of adaptation strategies. Please see the mentioned paper for more details on the theoretical framework of the model inversion technique we used. Critically, we will briefly present the different candidate models of our adaptation strategy repertoire.

	Hider	a = 1	a = 0
Seeker			
a = 0		(1, 0)	(0, 1)
a = 0		(0, 1)	(1, 0)

Note. (hider’s payoff, seeker’s payoff). Participants play the role of the seeker. The opponent is the hider.

Tableau 2. – Competitive payoff table

k-ToM Models

The mathematical derivation of *k*-ToM agents differs in how they estimate the probability of the opponent's choice from repeated observation of their opponent's behavior. *k* indexes a specific form of ToM sophistication, namely: the recursive depth of learners' beliefs (as in "I believe that you believe that I believe..."), starting with 0-ToM ("I believe").

Technically, 0-ToM does not attribute mental states to their opponent, but rather tracks their overt behavioral tendency without mentalizing. 0-ToM estimates the hidden state x of their opponent and updates it trial after trial using the Bayes rule.

0-ToM's learning rule is the starting point for a 1-ToM agent, who considers they are facing a 0-ToM agent. The issue here is that 0-ToM is playing according to a varying rule, so 1-ToM has to predict the opponent's choice by estimating 0-ToM's learning model parameters. Similarly to 0-ToM agents, 1-ToM uses a Bayes rule to estimate the across-trial varying hidden states but relies on first-order meta-beliefs (i.e., beliefs about beliefs) to do so, yielding a meta-Bayesian learning rule. In brief, 1-ToM learns how their opponent learns about themselves and behaves accordingly.

1-ToM agents are well suited for observational situations. However, when it comes to reciprocal social interactions, it would be beneficial to consider that others are also mentalizing, which 1-ToM doesn't consider. This calls for learning strategies that rely upon higher-order meta-beliefs, namely *k*-ToM agents where $k \geq 2$. This kind of agent has to learn the sophistication level of their opponent, in addition to the hidden states that control the opponent's learning and decision making. The difficulty this results in is that this *k*-ToM agent ($k \geq 2$) needs to consider different scenarios: each of their opponent's possible sophistication levels K ($K < k$) that yields a specific probability that they will choose a given action. Thus, the meta-Bayesian learning rule has to update *k*-ToM's uncertain beliefs about their opponent's sophistication as well as their hidden states.

The *k*-ToM agents with $k \geq 1$ are formally the only ones who can mentalize about others' covert mental states, i.e., represent and update others' beliefs by adopting the intentional stance (Dennet, 1989). It is assumed that the opponent's probability of choice is driven by their opponent's hidden beliefs and desires. More precisely, *k*-ToM ($k \geq 1$) agents consider that the opponent is a Bayesian agent, making them meta-Bayesian learners that rely upon recursive belief updating. Critically, the recursion of depth *k* yields distinct ToM sophistication levels that differ in terms of how they react to the history of players' actions in the game.

So far, we only described learning models that are capable of (artificial) ToM, except for 0-ToM. Below, we consider other possible strategies that people can use when learning in a social context without mentalizing.

Influence Learning (Hampton, 2008)

First, people could use a heuristic learning model, whose sophistication lies between 0-ToM and 1-ToM. This “influence learning” model adjusts in a 0-ToM fashion, but also incorporates knowledge of the “influence” of one’s own action in the opponent’s strategy (Hampton et al., 2008). However, an Influence Learning (Inf) agent cannot successfully compete with a 1-ToM agent because it is not endowed with actual mentalizing capacities (i.e., they do not assume that their opponent can also have ToM; Devaine et al., 2017).

Volatile Bayesian Learner

Second, one can extend a 0-ToM learning rule by adding a Bayesian update rule for the volatility of the opponent’s expected choice. This yields a sophisticated, non-mentalizing agent that can adapt its learning rate over the course of the experiment. We call it a Volatile Bayesian Learner.

Reinforcement learning

Third, our players may learn by trial and error, eventually learning which actions lead to a reward, which is the basis of reinforcement learning, or RL (Rescorla & Wagner, 1972). In this perspective, the expected payoff in a RL strategy does not exist because the value of the chosen option is directly updated in proportion to the reward prediction error. In brief, RL agents simply pick the most valuable option at the time of their choice.

Win-stay/loose-switch

Fourth, one can use an even simpler way to adapt to their opponent’s behavior by reacting with a binary rule such as: repeat one’s last choice if it was successful, alternate otherwise. This strategy is called win-stay/lose-switch (WSLS). It has been shown to have good adaptive properties, despite its simplicity (Nowak & Sigmund, 1993).

Random-biased (RB)

Lastly, one very simple, yet risk-minimizing strategy can be to simply act randomly. Indeed, this probabilistic policy can prevent one’s opponent from controlling one’s expected payoff. It avoids

being controlled at the cost of having chance-level success. We did augment this model with a potential bias for one of the other two alternative options (as in all the above learning models), so we refer to it as Random-biased or RB.

Analysis set-up and behavioral analysis

Our working hypothesis is that people may not always rely on the same adaptation strategy across different game sessions or framings (social vs. non-social). Rather, they select a strategy from a repertoire, whose flexibility and ToM-sophistication define our computational phenotypes. The empirical estimation of these thus consists of three steps. First, we perform a statistical (Bayesian) comparison of learning models (Stephan et al., 2009). For each subject, we fit trial-by-trial action (a) sequences $a_{1:40}$ with each candidate learning model ($m \in \{VL, RB, WSLS, RL, 0 - ToM, Inf, 1 - ToM, 2 - ToM, 3 - ToM\}$) using a Variational Bayesian approach (Daunizeau et al., 2009; Friston et al., 2007). This technique is called Model Inversion (MI) it yields *Model Evidences*, which can be understood as a score for each inverted candidate learning strategy. There are 9 MI per participant, per opponent, per framing ($9 \times 126 \times 7 \times 2 = 15\,876$ total Model Evidences). Second, we define the repertoire's flexibility (\hat{f}) of each participant in terms of their posterior probability to employ different adaptation strategies across two conditions (here, framings). Third, we define the participants' repertoire of ToM-sophistication (\hat{k}) in terms of the expected depth of recursive belief updating. We will restrict \hat{k} 's computation to k -ToM models because the depth k of recursive beliefs is not defined for the other learning models. We will measure the repertoire's ToM-sophistication \hat{k} in both framings (social and non-social). After an *a posteriori* visual examination of the model inversion parameters, our team decided to add an alternance/perseveration parameter that ranges with a tipping point of 0 (i.e., if the value of this parameter is higher than zero, it means the player was displaying perseverating tendencies, whereas if the value was lower than zero, the player was displaying alternating tendencies). This parameter was added because, according to the model fitting metrics, a part of the variance wasn't detected with any of the parameters of our models. Thus, when observing the choice sequence of a couple of random participants, we saw that they tend to use a more automatic strategy, namely alternating or perseveration. Analyses were performed using the Variational Bayesian Analysis (VBA) toolbox in Matlab 2021b.

Statistical analysis

From the indices derived through the VBA toolbox, we tested two different approaches regarding diversity in our sample: a categorical one where ASD, AD and ADHD are regarded as differential diagnostics, and a dimensional one, where ASD, AD and ADHD are traits that could potentially be continuously varying traits in one population. In the latter, the traits are underpinned by symptom measures.

In the categorical approach, we performed mixed 5x2x4 (opponents x framing x group) ANOVAs to determine if there was any differential effect of the alternance/perseveration indice or the performance. The latter was computed as follows: number of trials won/40 (total number of trials). For \hat{k} , we performed a 2x4 (framing x group) mixed ANOVA and for \hat{f} , we performed a one-way ANOVA with the group as the between-subject factor. No confusion variables were considered in this analysis, as sex and age were not significantly associated with our variables of interest.

In the dimensional approach, we computed an exploratory correlational matrix with the different clinical measures and performance and the computational phenotype (alternance/perseveration, \hat{k} and \hat{f}) to explore a symptom-based hypothesis. More precisely, we wanted to see if, when removing the clinical labels (i.e., the groups), the severity and type of symptoms could be significantly associated with the computational phenotype or performance in the task.

Data and code availability

Individually codified data can be made available upon request of the corresponding author (LM). The VBA Toolbox used to analyze data is available at <https://github.com/MBB-team/VBA-toolbox>. The code for statistical tests and the aggregated statistics of the groups can be found on our team's GitHub repository: <https://github.com/ppsp-team/ToMASD>.

Results

Estimated frequencies of adaptation strategies

We performed a group-level random-effect Bayesian model comparison (RFX-BMC) to illustrate the frequency of the distinct models that could best describe the behavior of our participants (Rigoux et al., 2014; Stephan et al., 2009). Results are displayed in Figure 6.

First, we observed that only the RL strategy was used in all framings in each group. Moreover, in the ASD group, 0,2,3-ToM, RL and RB were used in both framings, while WSLS was only used in the non-social framing. In the ADHD group, 0, 2, 3-ToM and RL were used in both framings, while volatileVB was used only in the social framing and 1-ToM only in the non-social framing. In the AD group, 3-ToM and volatileVB were used specifically in the social framing, and 2-ToM and WSLS were used only in the non-social framing. In the NT group, 2,3-ToM, RL and RB were used in both framings, while WSLS was only used in the non-social framing. Overall, every group uses RL strategy more frequently than the other strategies, and within groups, we observe little variation in strategy repertoire between framings.

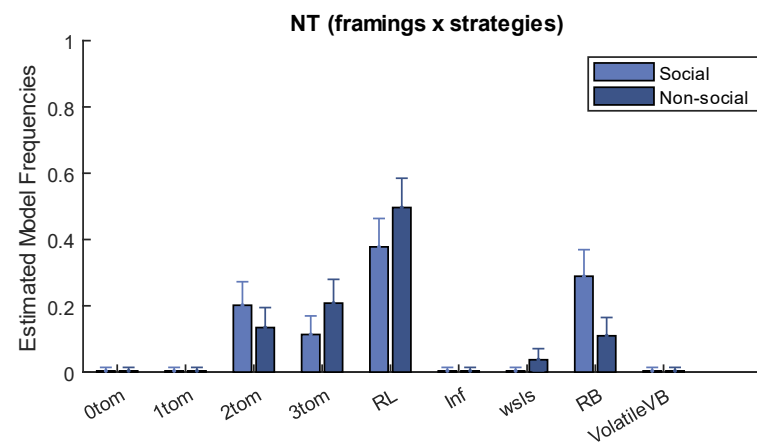
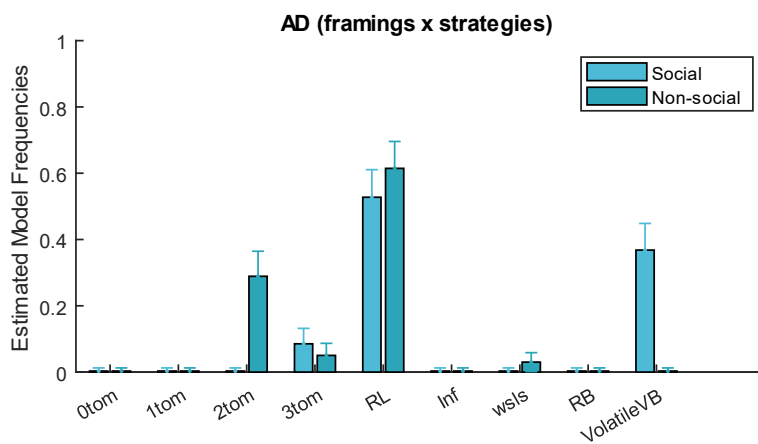
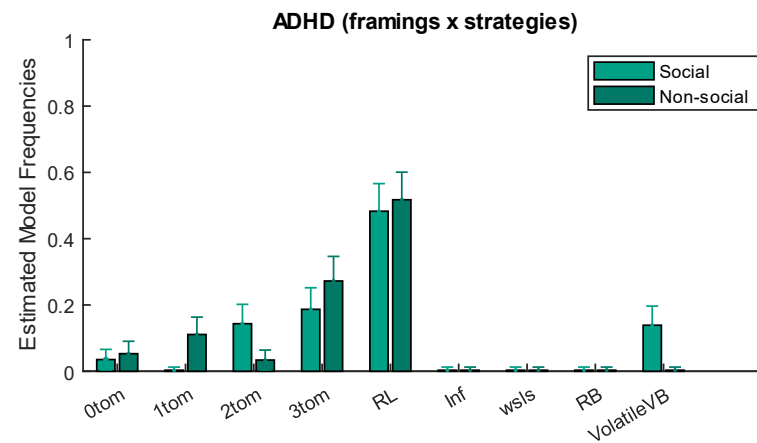
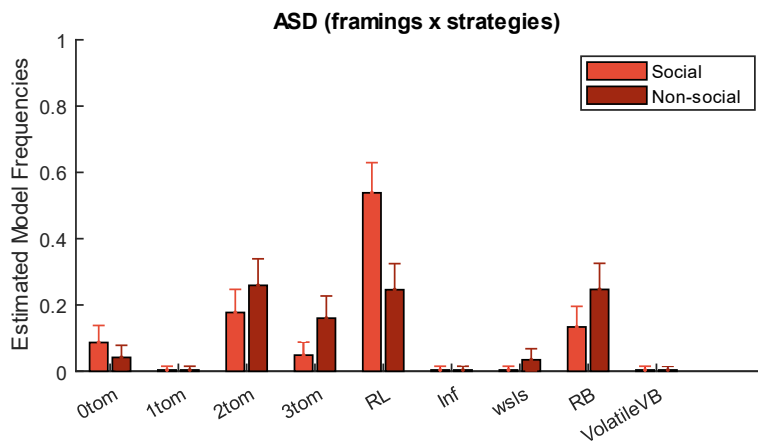


Figure 6. – Estimated model frequencies for each group performed by RFX-BMC

Performance

Here, we wanted to see if there were any differences in terms of group, framing, and type of opponent for the performance. To do so, we performed a 4 (Group [ASD, ADHD, AD, NT], between factor) x 2 (Framing [social, non-social], within factor) x 5 (Opponent [0-ToM, 1-ToM, 2-ToM, RB, Seq], within factor) three-way mixed ANOVA with the performance score as the dependent variable. First, we found a significant Group x Opponent two-way interaction ($F[9.40, 382.27] = 2.552, p = 0.00279, \eta^2 = 0.023$). Post-hoc pairwise independent t tests with a Bonferroni correction showed that the differences were only found when players were against 2-ToM and RB opponents (see Figure 7). Specifically, both AD and ASD performances were lower than ADHD performances (resp. $p = 0.0461, 0.00086$) and NT (resp. $p = 0.005, 0.0000683$) against the RB opponent. Furthermore, NT performances were higher than ADHD ($p = 0.00835$) and ASD ($p = 0.00342$) performances against the 2-ToM opponent. Altogether, this means that group differences in performance were found both in the least (RB) and the most (2 ToM) sophisticated opponents.

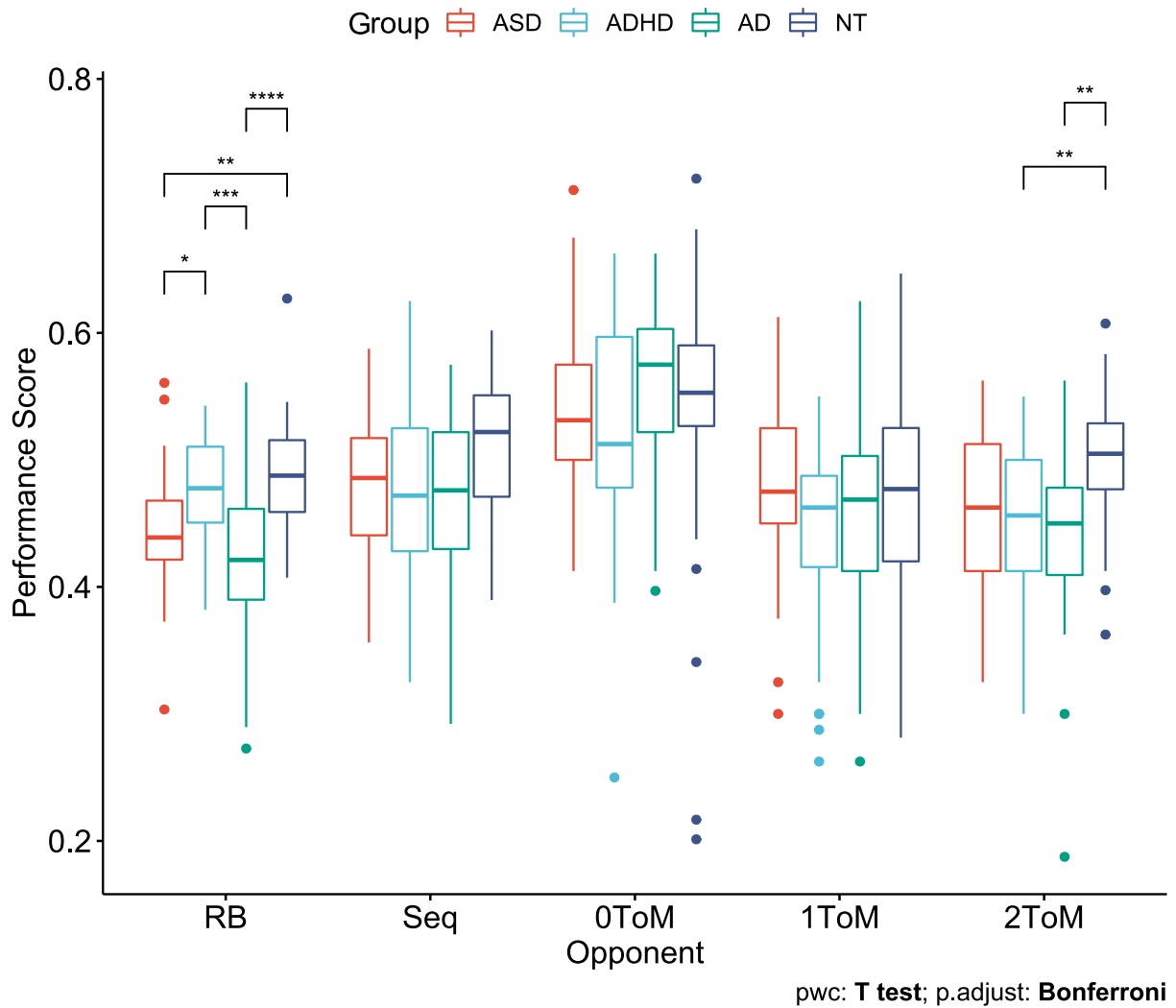


Figure 7. – Two way interaction between opponent and group for performance scores

Second, we explored the dimensional hypothesis by answering this question: is there any association between performance and clinical measures when removing the diagnostic labels that typically segregate our participants? To do so, we performed an exploratory correlation matrix with our clinical measures and our performance scores in the social and non-social framing (see Table 3). There were significant negative correlations with the performance score of our participants in the social framing and CBCL’s “Thought Problems” ($r = -0.012, p = 0.0192$) and “Total Problems” ($r = -0.018, p = 0.000179$) subscales, BRIEF ($r = -0.012, p = 0.0152$), CONNERS ($r = -0.017, p = 0.000784$), SCARED ($r = -0.010, p = 0.05$) and SCQ ($r = -0.013, p = 0.00626$). We found significant negative associations between performance in the social framing and clinical measures that

measured symptoms characteristically associated with all three of our studied clinical populations and with the global severity of the symptoms.

Computational phenotype

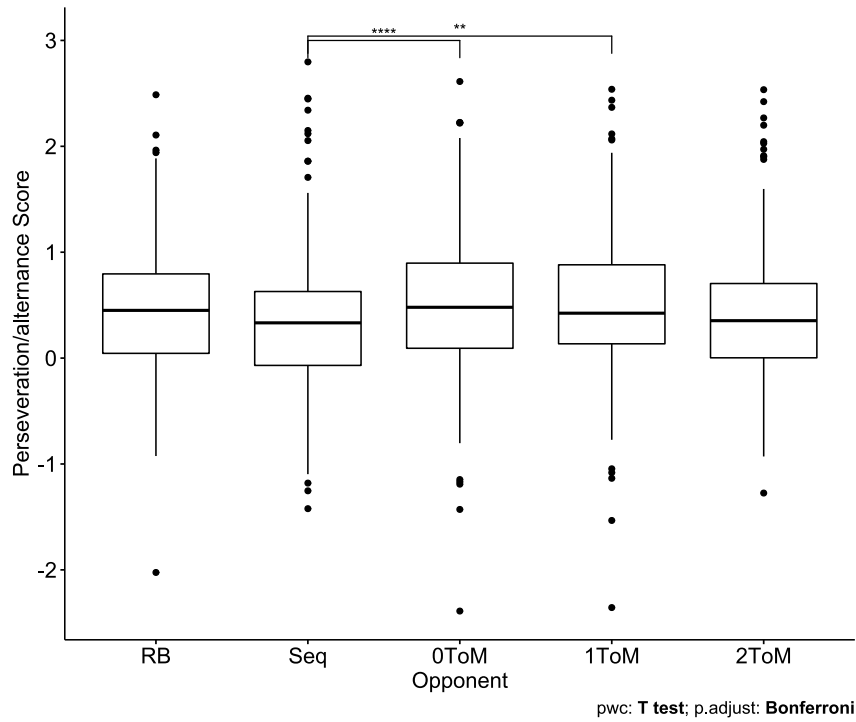
We then wanted to see whether \hat{k} or \hat{f} were differentiable in terms of framing or group. For sophistication, we performed a 4 (Group [ASD, ADHD, AD, NT], between factor) x 2 (Framing [social, non-social], within factor) two-way mixed ANOVA with the sophistication estimate as the dependent variable. No significant interaction nor main effects were found ($p = 0.305$). As for flexibility, a (Group [ASD, ADHD, AD, NT], between factor) one-way ANOVA was performed with the flexibility estimate as the dependent variable. No significant effect was found ($p = 0.983$). We also tested this with the alternance/perseveration index. Since an alternance/perseveration parameter was extracted from each model inversion, we actually had an alternance/perseveration score for each participant against each opponent in each framing. Therefore, we performed a 4 (Group [ASD, ADHD, AD, NT], between factors) x 2 (Framing [social, non-social], within factor) x 5 (Opponent [0-ToM, 1-ToM, 2-ToM, RB, Seq], within factors) three-way mixed ANOVA with the alternance/perseveration estimate as the dependent variable. No significant interactions were found, but we found significant main effects of Opponent ($F[3.39, 413.66] = 4.773, p = 0.002, ges = 0.008$) and Group ($F[3, 122] = 2.890, p = 0.038, ges = 0.034$). Post hoc paired t tests with a Bonfferoni correction revealed that for the main effect of opponent, perseveration (since the group mean was higher than zero) was higher against the RB opponent than against the 0-ToM ($p = 0.0000598$) and 1-ToM opponent ($p = 0.002$; see Figure 8(A)). As for the main effect of group, post hoc independent t tests with a Bonfferoni correction showed that perseveration (since the group mean was higher than zero) was higher in ASD than in all the other groups (AD: $p = 0.000000012$; ADHD: $p = 0.0212$; NT: $p = 0.00000244$). Additionally, perseveration was significantly higher in ADHD compared to AD ($p = 0.00635$; see Figure 8(B)). Overall, flexibility and sophistication estimates were not differentiable in terms of Framing or Group, but alternance/perseveration was higher against a random opponent (RB) compared to more sophisticated ones (0-ToM, 1-ToM) and ASD used more perseveration than the other groups overall.

		CBCL							
		Thought problems	Social problems	Anxious distress	Total problems	BRIEF	CONNERS	SCQ	SCARED
Social	<i>Perf.</i>	*-0.012	-0.008	-0.009	***-0.018	*-0.012	***-0.017	** -0.013	-0.010
	<i>Pers/Alt.</i>	0.036	-0.008	0.030	*0.085	0.042	0.072	0.068	0.082
		0.067	0.080	0.115	0.103	0.077	0.048	0.011	0.065
Non social	<i>Performance</i>	-0.004	-0.008	-0.009	-0.008	-0.001	-0.003	-0.001	-0.005
	Perseveration/alternance	0.076	-0.004	0.052	0.085	0.021	0.027	0.053	*0.111
	Sophistication	0.001	0.052	-0.050	0.033	0.036	0.041	0.121	0.061
	Flexibility	0.007	-0.018	0.001	-0.014	-0.023	-0.021	0.009	-0.006

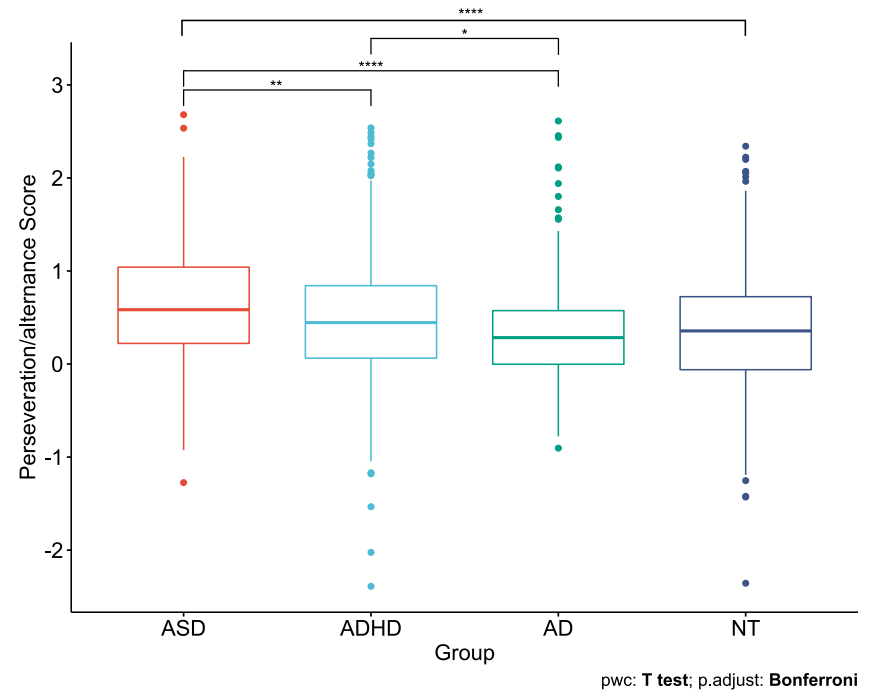
Note. * = p < 0.05; ** = p < 0.01; *** = p < 0.001; Perf: performance scores; Pers/Alt: Perseverance/alternance scores;

Tableau 3. – Exploratory correlation matrix

A.



B.



Note. * = $p < 0.05$; ** = $p < 0.01$; *** = $p < 0.001$;

Figure 8. – Perseveration/alternance main effects. (A) Opponent; (B) Group

On the dimensional side, no significant associations were found with our clinical measures for either sophistication or flexibility. However, we found significant positive associations between alternance/perseveration in the social framing and the “Total Problems” subscale of the CBCL ($r = 0.085$, $p = 0.0341$) and between alternance/perseveration in the non-social framing and the SCARED scale ($r = 0.111$, $p = 0.0446$) (see Table 3). Thus, higher perseveration was positively associated with clinical measures that measured symptoms characteristically associated with AD and with the global severity symptoms, regardless of clinical label.

Discussion

This research was designed to elucidate the behavioral mechanisms of typically developing children and those with psychiatric disorders, as observed during an interactive game that quantifies social reciprocity. The game utilized computational phenotyping by means of a Variational Bayesian Analysis. This discussion will go over the main results of this study and its implications, as well as limits and future directions. This is a pioneering study integrating a multidimensional and overlapping clinical population, VBA model inversions, and an interactive social task. Therefore, we will also suggest methodological guidelines and specify hypotheses for potential future research.

During our reciprocal social task, autistic children exhibited a distinguishing tendency to persevere in the task, regardless of comorbidity. Indeed, the ASD group had significant differences in terms of perseverance scores with all three other groups (NT, ADHD and AD), but the two other clinical groups (ADHD, AD) did not differ from the NT group. Thus, we suggest that perseveration in a social interactive task could be a good indicator of ASD. Restricted and repetitive behavior is a key ASD diagnostic criterion, and perseverative tendencies align with previous observations of rigidity and low adaptability in autistic children (Bennetto et al., 1996; Prior & Hoffmann, 1990). A recent study has also shown significant associations between parent-reported social communication skills and cognitive flexibility in middle-school aged autistic children (Kouklari et al., 2018). Our results support this claim as task performance was lower in ASD than NT. Familiarity preference in autistic individuals could present another potential explanation for these perseverative tendencies (Maes et al., 2011). Thus, in an interactive social task, perseverative behavior could distinguish

ASD from other clinical and pediatric populations. However, these findings necessitate replication and validation due to the post-hoc addition of the alternating/perseveration parameter.

The fact that all players had greater perseverance/alternating tendencies against a random opponent than a sophisticated opponent shows that the algorithmic opponents could indeed be imbued with a certain ToM. The players tended to infer mental states in sophisticated agents because they might have displayed choices that were more in line with real human beings. This is in line with previous work (Devaine et al., 2014b). The fact that this result was not found against the 2-ToM agent might be because the timeframe to make the choice in the task was too quick (1500 ms) to pick up on 2nd level recursivity of mental state attribution.

Children's behavior in this interactive task diverged significantly from adults in terms of their strategy adaptation repertoire, their tendency to switch strategies between social and non-social framings and the mental states they attribute to their opponent. The dissociation between framings observed in Forgeot d'Arc and colleagues' earlier work with adults didn't replicate in this study with children. Irrespective of the group or framing, a reinforcement learning strategy was consistently employed. This suggests a developmental effect on the social reciprocal abilities quantified in this task. Although RL strategies were prevalent, we observed a significant proportion of k-ToM strategies, aligned with certain research showing intellectually disabled children outperforming matched adult peers in ToM tasks (Jervis & Baker, 2004). In the NT population, computational strategies do change during development: adolescents use more basic reinforcement learning models — like RL adaptation strategies — while adults integrate more complex computational features (Palminteri et al., 2016). Therefore, children might not have been compelled to use only complex computational strategies in this specific task. Aside from the developmental effect, the lack of specificity of our task to identify social reciprocity abilities in pediatric populations, the constraints of our experimental setting and the overlap of our clinical groups might explain the non-replication of adult-to-child sophistication and flexibility indices results. However, it is not rare to observe a lack of replication in ASD studies, mainly due to the heterogeneity of this population (Amaral et al., 2019). This is even more relevant in our case, as we didn't exclude comorbidity in the hopes of better reflecting the clinical reality. Replication studies in autism research are scarce and seem to present limitations when successful (Ferguson et al., 2020;

Torenvliet et al., 2022; Torrico et al., 2017). Thus, we have not been able to replicate findings from adults to children in the autistic population, but this is in line with the current literature.

This study showed on one hand that performance scores were higher in children without psychiatric diagnoses. On the other hand, clinical scales measuring a broad spectrum of psychiatric symptoms correlated with higher performance in the social framing. Taken together, this suggests that symptom severity and diagnosis may inhibit children's abilities to deduce the opponent's strategy, hindering performance. Literature has relatively consistently shown that children with ASD have some type of social impairment when measured in diverse interactive tasks (Baixauli-Fortea et al., 2019; Birmingham et al., 2017; Cáceres et al., 2014). These difficulties are commonly navigated through verbal abilities, which could explain their lower performance levels in this study's non-verbal task. Children with AD have been shown to exhibit hypermentalizing or unoptimal social sensitivity (Hezel & McNally, 2014; Washburn et al., 2016). In the case of our study, time to answer at each trial was limited (1500 ms), so hypermentalizing in AD children could have been detrimental to their performance by preventing them from making a "quick-thinking" choice. Similarly, ADHD individuals exhibit social cognition impairments, albeit lesser than ASD, which could be linked to lack of behavioral regulation processes such as inhibition and emotional regulation (Bora & Pantelis, 2016; Miranda et al., 2017). Taken together, these explanations could explain why all three clinical groups performed worse than the NT group, but did not differ significantly from each other. The dimensional analysis also showed that all three types of symptoms were associated with poor performance, showing that different disorders could lead to the same level of performance in this task. However, these findings should be replicated in confirmatory studies.

This study has limitations. It is partly exploratory, and the alternating/perseveration parameter and NT group were added after the first design of this study. As such, robust replication is necessary for confirmatory conclusions. The experimental manipulation could have failed, and we did not do a debriefing to verify its efficacy. The study's confounding factors may include comorbidity, which may also impact statistical power, and the robustness of the computational analysis used. Moreover, the experimental setting's uncertainty might have influenced participants' behavior, leading to more homogeneous behavioral modeling across framings and groups (Daunizeau et al., 2010). The ambiguity might originate from the participants' age and capacity to comprehend abstract

instructions, or the potential for children to anthropomorphize the stimuli representing the computer opponent in the non-social framing.

This study sought to emulate the complexity of clinical reality and foster further multidimensional computational research on social reciprocity. The conclusions offered could direct hypotheses in future confirmatory studies. This study also highlights that while the scientific community acknowledges the promising potential of precision medicine, implementing it in heterogeneous and comorbid clinical populations might present challenges. Therefore, future studies must focus on better understanding the complexity of clinical settings and assess how conclusions from prototypic research samples apply to ecological clinical populations.

Conclusion

In conclusion, we found that clinical pediatric populations tend to have lower performance than typically developing children in a computerized interactive social task and that perseverance might be a potential correlate to identify ASD amongst those populations. This study helped highlight the complexity of clinical reality in children with psychiatric diagnoses. It also showed that findings in adults do not necessarily replicate in children in a social reciprocity task.

Authors' contributions

LM helped with data collection, interpreted, analyzed and wrote up the study. JL assisted in the analysis of the athlete data. KC, PL and QD assisted in collecting the data. TB helped with analysis of the data. JD provided the BrainUs platform and was a consultant throughout the analysis process. BFA designed the study, helped with interpretation and reviewed the manuscript. GD helped with analysis of the data, interpretation and reviewed the manuscript.

Acknowledgements

This study was supported by the Institute for Data Valorization, Montreal (IVADO; CF00137433) and enabled in part by support provided by Calcul Québec (www.calculquebec.ca) and Digital Research Alliance of Canada (www.alliancecan.ca).

We want to thank Sean Spinney who helped set the behavioral analysis and detangle the experimental setup.

LM was supported by the Fonds Daoussis and the Transforming Autism Care Consortium (TACC).

GD was supported by the Fonds de recherche du Québec (FRQ; 285289), Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC; DGEER-2023-00089), and the Azrieli Global Scholars Fellowship from the Canadian Institute for Advanced Research (CIFAR) in the Brain, Mind, & Consciousness program.

BFA acknowledges support from “Fondation les Petits Trésors de l’Hôpital Rivières-des-Prairies” and the “Fonds de Recherche du Québec – Santé” (FRQS).

Competing interests

The authors have no competing interests to disclose.

Discussion

Cette étude visait à identifier et étudier les mécanismes implicites du comportement social d'enfants au développement normal et d'enfants avec troubles psychiatriques dans un jeu interactif informatisé mesurant les capacités socio-émotionnelles réciproques par le biais d'un phénotypage computationnel. À notre connaissance, il s'agit de la première étude qui tente de combiner l'étude multidimensionnelle de populations cliniques et partiellement homogènes, des méthodes d'analyse computationnelles et une tâche sociale interactive. Par conséquent, cette étude visait également à guider les études futures en fournissant des recommandations méthodologiques et en spécifiant des hypothèses basées sur les informations apprises au cours de ce projet et sur les résultats obtenus. Cette discussion passera en revue les principaux résultats de cette étude et leurs implications. Nous discuterons également des limites, des directions que devraient prendre les études futures et des applications cliniques potentielle de la tâche du PHG.

Persévérance chez les enfants autistes

Au cours de notre tâche interactive mesurant la réciprocité socio-émotionnelle, les enfants autistes se distinguaient des enfants non-autistes par leur tendance à persévérer au cours de la tâche, quel que soit leur autre diagnostic. En d'autres mots, les enfants classés dans le groupe TSA avaient un score de persévérance significativement plus haut que les enfants NT et ce, même si les enfants du groupe TSA présentaient parfois d'autres diagnostics que le TSA (TDAH ou TA). Nous suggérons donc que la tendance à persévérer pourrait être un bon indicateur de la présence spécifique d'un TSA chez un enfant. En effet, cela ne pourrait pas être dû au TDAH ou au TA, puisque ces groupes ne présentaient pas un score de persévérance significativement différent du groupe neurotypique. De plus, le score de persévérance du groupe TSA est statistiquement différent du score de persévérance des groupes TDAH et TA. Non seulement la persévérance fait partie des principaux critères diagnostiques du TSA (comportements restreints et répétitifs), mais ces tendances pourraient également être assimilées à un comportement rigide, appelé inflexibilité, précédemment mis en évidence chez les enfants autistes d'âge scolaire (Bennetto et al., 1996; Prior & Hoffmann, 1990). Une étude récente a d'ailleurs montré une association significative entre les compétences de communication sociale rapportées par les parents et la flexibilité cognitive chez des enfants autistes d'âge moyen (Kouklari et al., 2018). Nos résultats soutiennent cette affirmation, car la performance à la tâche était plus faible dans le groupe TSA que dans le groupe NT et la persévérance peut s'expliquer par une faible flexibilité cognitive. Ainsi, les enfants autistes de notre

étude ont à la fois démontré une rigidité cognitive et des compétences de communication sociale faibles par le biais de leur score à notre tâche sociale interactive. Une autre étude a montré que la persévérance pourrait s'expliquer par une préférence pour la familiarité chez les personnes autistes (Maes et al., 2011). Ainsi, les enfants autistes ont peut-être préféré jouer sans tenter de nouvelles stratégies et ainsi, garder un principe plus automatique. Cette tâche était effectivement nouvelle pour eux. Cependant, nous voulons mentionner que la modalité de mesure (questionnaires, tâche, observation) des concepts discutés (compétence sociale, persévérance, flexibilité cognitive) n'est pas constante d'une étude à l'autre. Par conséquent, la validité de concept est discutable. Nous concluons que la persévérance peut potentiellement différencier les enfants autistes (même s'ils présentent une comorbidité) des autres populations cliniques et pédiatriques générales, mais que la modalité de mesure doit être prise en considération et rester constante, dans la mesure du possible, pour s'assurer que le même concept sous-jacent est mesuré.

Peu importe le groupe, la tendance à jouer de manière plus automatique (soit, la tendance à persévérer/alterner sans prendre en compte la rétroaction essai-par-essai), était significativement plus grande contre un adversaire aléatoire en comparaison avec des adversaires plus sophistiqués. Ce résultat indique que les agents sophistiqués qui ont fait face aux joueurs avaient effectivement des capacités méta représentatives. Effectivement, on peut penser que les agents sophistiqués ont effectués des choix qui ont motivé les joueurs à jouer de manière moins automatique, tandis que l'agent aléatoire a bel et bien été perçu comme un adversaire qui ne suivait aucune logique. Par exemple, les enfants ont peut-être vu qu'aucun état mental ne pouvait être attribué à l'adversaire aléatoire, donc la meilleure manière d'essayer de le vaincre était de jouer de manière plus automatique, sans stratégie. Cela apporte des confirmations empiriques aux simulations effectuées dans des travaux précédents (Devaine et al., 2014b). Ce résultat n'a pas été trouvé pour l'agent 2-ToM. Cependant, cela pourrait être parce que le temps de réponse maximum (1500 ms) était trop court pour que les joueurs puissent reconnaître des attributions mentales de deuxième niveau (« Il pense que je pense... »).

Performance et associations avec les mesures cliniques

Notre étude a révélé que les scores de performance étaient plus élevés chez les enfants sans diagnostic psychiatrique. Également, les échelles cliniques mesurant les symptômes psychiatriques des trois conditions à l'étude étaient associées à des scores de performance plus élevés dans le

contexte social. Pris ensemble, ces résultats pourraient signifier que lorsque les enfants pensaient jouer contre un adversaire en ligne, l'intensité de leurs symptômes, et donc leur diagnostic, les empêchait de saisir correctement la stratégie de leur adversaire et donc de le contrecarrer. La littérature a montré de manière relativement cohérente que les enfants autistes présentent une forme ou une autre d'atypie du comportement social lors de tâches interactives (Baixauli-Fortea et al., 2019; Birmingham et al., 2017; Cáceres et al., 2014). Pour toutes ces études, l'interprétation des résultats est que les enfants autistes utilisent leurs habiletés verbales pour naviguer les situations sociales et compenser leurs difficultés. Cependant, la tâche dans notre étude était non verbale, ce qui pourrait expliquer pourquoi les joueurs n'ont pas pu égaler la performance de leurs pairs neurotypiques. En ce qui concerne le groupe TA, la littérature scientifique montre que les déficiences sociales sont généralement dues à l'hypermentalisation ou à des niveaux inappropriés de sensibilité sociale (Hezel & McNally, 2014; Washburn et al., 2016). Dans le cas de notre étude, le temps de réponse à chaque essai était limité, de sorte que l'hypermentalisation a pu être préjudiciable aux participants du groupe TA, en les empêchant de faire un choix rapide. En ce qui concerne le TDAH, une méta-analyse a conclu que les personnes avec un TDAH semblent présenter des difficultés en matière de cognition sociale, en particulier pour la ToM, bien qu'à un niveau moindre que les personnes autistes TSA, mais toujours significativement plus que les contrôles neurotypiques (Bora & Pantelis, 2016). Une étude de réplication de ces résultats suggère que les difficultés semblent être liés à des processus de régulation comportementale tels que l'inhibition et la régulation émotionnelle (Miranda et al., 2017). Prises ensemble, ces explications pourraient aider à comprendre pourquoi les trois groupes cliniques ont obtenu de moins bons résultats que le groupe NT. Cependant, rien ne peut être conclu à partir des associations cliniques, car une matrice de corrélation exploratoire n'est pas un test statistique déductif. D'autres études devraient tenter de confirmer ces associations dimensionnelles avec un devis expérimental.

Homogénéité du phénotype computationnel

Bien qu'il ne s'agisse pas de la pratique la plus courante dans la littérature, il nous a semblé important de discuter de l'absence de différence dans notre échantillon, notamment pour l'indice de sophistication et de flexibilité. La tâche utilisée est destinée, en théorie, à détecter les atypies ou déficits de réciprocité sociale émotionnelle par un phénotypage computationnel de la séquence de choix des participants. Le phénotype computationnel se constitue de corrélats comportementaux

quantitatifs: la sophistication et la flexibilité (Forgeot d’Arc et al., 2020). Les résultats de cette étude ont montré que la sophistication et la flexibilité des joueurs des groupes cliniques n’est pas différente de celle du groupe neurotypique. Cela est peut-être dû à un paramètre qui n’a pas été mesuré dans notre tâche, c’est-à-dire un autre aspect du comportement qui n’a pas été inclus dans le phénotype computationnel. D’autres techniques d’analyse pourraient être considérées pour les études subséquentes. Pour l’instant, il semble que la sophistication et la flexibilité ne sont pas des indices qui peuvent différencier des enfants avec un trouble psychopathologique d’enfants au développement typiquement. Cela va à l’encontre des résultats obtenus chez l’adulte (Forgeot d’Arc et al., 2020). Plus d’études sont nécessaires pour comprendre comment la réciprocité sociale se développe chez les enfants mais, pour l’instant, il semble que la sophistication et la flexibilité ne sont pas des corrélats de la réciprocité sociale qui différencient les populations cliniques et neurotypiques pendant l’enfance.

S’il est surprenant de constater l’absence de différence entre les groupes cliniques et le groupe NT, il n’est peut-être pas aussi surprenant de constater cette absence de différence entre les groupes cliniques eux-mêmes. Dans un *Commentary* récent, les auteurs ont indiqué que des modèles computationnels tels que le nôtre n’ont pas encore été testés, mais qu’ils pourraient être une avenue potentielle pour déterminer s’il est possible de détecter l’autisme, même en présence de comorbidité (Henco & Schilbach, 2021). Cela montre le caractère nouveau de cette technique d’analyse. Elle était également prometteuse vu les résultats obtenus chez les adultes (Forgeot d’Arc et al., 2020). Bien qu’il soit logique de tenter de répliquer ces résultats chez une autre population (ici, les enfants), il est aussi très possible que cette technique ne s’applique pas aussi bien au sein de celle-ci. Nous croyons qu’il est tout de même important que les résultats soient discutés et rapportés à la communauté scientifique pour que d’autres avenues soient explorées. Ces avenues potentielles sortent du cadre de ce mémoire. Cependant, nous pouvons dire que la méthode computationnelle utilisée dans notre étude ne semble pas assez spécifique pour détecter des différences subtiles entre des populations cliniques qui présentent chacune une forme de déficits de réciprocité socio-émotionnelle (Baron-Cohen et al., 2001; Bora & Pantelis, 2016; Hezel & McNally, 2014; Miranda et al., 2017; Sally & Hill, 2006). Cela pourrait également signifier qu’elles se confondent ou interagissent lorsqu’elles sont présentées ensemble, ce qui les rend presque impossibles à différencier. Cela souligne l’importance de mener des recherches qui intègrent la complexité et les défis de la réalité clinique (p. ex., le diagnostic différentiel en présence de comorbidité). La

littérature a également montré que les symptômes anxieux ou attentionnels chez les personnes autistes pouvaient aggraver les atypies sociales (Factor et al., 2017). Cela pourrait également expliquer le manque de différenciation entre nos groupes cliniques.

Non-réplication des résultats chez la population autiste adulte

Notre étude a montré que les enfants semblent se comporter différemment des adultes dans une tâche interactive destinée à mesurer la réciprocité socio-émotionnelle en ce qui concerne leur répertoire de stratégies d'adaptation et leur tendance à agir différemment en fonction du contexte (social, non-social). La dissociation entre le contexte social et non-social observée dans les travaux antérieurs de Forgeot d'Arc et de ses collègues sur les adultes ne se reproduit pas chez les enfants. Nous n'avons pas non plus trouvé, dans le groupe TSA, la prévalence de la stratégie d'apprentissage par influence observée chez les adultes. Ce qui a plutôt été observé est que quels que soient le groupe et le contexte, une stratégie d'apprentissage par renforcement était toujours utilisée dans une certaine proportion. Ce résultat pourrait nous amener à penser qu'il y a un effet développemental sur les capacités de réciprocité sociale mesurées par notre tâche. Bien que nous ayons observé principalement des stratégies RL chez les enfants, nous avons également pu constater une proportion assez importante de stratégies *k*-ToM. Cela est conforme à une certaine étude dans laquelle des enfants présentant une déficience intellectuelle ont obtenu de meilleurs résultats que leurs pairs adultes dans diverses tâches de ToM (Jervis & Baker, 2004). Dans la population générale, il a été observé que les stratégies de jeu extraites par analyse computationnelle évoluaient au cours du développement : les adolescents utilisaient des modèles d'apprentissage par renforcement plus basiques, comme la stratégie d'adaptation RL, tandis que les stratégies des adultes devaient être modélisés par des modèles intégrant des paramètres plus complexes (Palminteri et al., 2016). De plus, les enfants n'ont peut-être simplement pas perçu l'intérêt d'utiliser des stratégies complexes. Cela est également logique si l'on tient compte du fait qu'il y avait des centaines d'essais et un temps de réponse limite assez bas (1500 ms). De plus, l'absence de réplication des résultats concernant l'indice de sophistication et de flexibilité entre les adultes et les enfants pourrait également s'expliquer par le manque de spécificité de notre tâche pour détecter les capacités de réciprocité sociale des populations pédiatriques. Cela pourrait également être dû aux limites de notre cadre expérimental, que nous aborderons plus loin.

Cependant, il n'est pas rare d'observer un manque de réplication dans les études sur l'autisme, principalement en raison de l'hétérogénéité de cette population, de la méthodologie et de la taille des échantillons (Amaral et al., 2019; Loth et al., 2021). Le cas de l'hétérogénéité est d'autant plus pertinent dans notre cas, puisque nous n'avons pas exclu de notre échantillon les enfants présentant une comorbidité et ce, dans l'espoir de mieux refléter la réalité clinique. Les études de réplication dans la recherche sur l'autisme sont rares et présentent d'importantes limites lorsque la réplication est réussie (Ferguson et al., 2020; Torenvliet et al., 2022; Torrico et al., 2017). Par conséquent, nous devons rester très prudents lorsque nous interprétons et généralisons les résultats de nos recherches. Particulièrement dans le domaine de l'autisme, il est important de prendre conscience du compromis qui existe entre la validité clinique et l'homogénéité prototypique des échantillons recrutés pour les études (Rabot et al., 2023). La communauté scientifique doit parvenir à un consensus sur l'importance qu'elle veut accorder à ces deux concepts opposés afin que les recherches futures puissent être davantage transposables et généralisables, tout en minimisant les biais et les facteurs de confusion. Pour ceci, il faut augmenter la communication entre les groupes de recherche afin de favoriser un sentiment d'identité partagée et motiver les chercheurs à adopter des pratiques de recherche uniformes (Koivumäki & Wilkinson, 2020).

Limites

Cette étude présente plusieurs limites et est en partie exploratoire. En effet, le paramètre alternance/persévérance et le groupe NT ont été ajoutés après la conception initiale de l'étude mais avant toute analyse statistique. Ainsi, bien qu'ils n'aient pas été ajoutés pour confirmer une hypothèse ajoutée postérieurement, nous ne pouvons tout de même pas affirmer que les résultats tirés de ces ajouts sont confirmatoires. Par conséquent, la première limite de cette étude est que tout résultat devrait être reproduit dans une étude confirmatoire ultérieure pour être considéré comme robuste. Deuxièmement, il est plausible que la manipulation de cette étude (c'est-à-dire de faire croire aux enfants qu'ils jouaient contre un adversaire humain en ligne) n'ait pas fonctionné, et aucun débriefing n'a été effectué pour le vérifier. Il avait été assumé que la manipulation fonctionnait car sa vérification avait été effectuée de manière approfondie dans l'étude menée auprès de la population adulte (Forgeot d'Arc et al., 2020). Cependant, cela pourrait expliquer pourquoi nous ne voyons pas de différence entre les contextes dans la présente étude. Ainsi, la possibilité que la manipulation n'ait pas fonctionné ne peut pas être écartée. Ainsi, nous

recommandons que la vérification de la manipulation soit réalisée systématiquement dans les études subséquentes. Troisièmement, bien que nous considérions qu'il s'agit d'un point fort de notre étude, il faut mentionner l'effet de confusion potentiel que la comorbidité peut avoir eu sur nos résultats. En outre, cela aurait pu avoir un impact sur la puissance statistique. Enfin, nous devons tenir compte de la possibilité que l'analyse computationnelle choisie pour modéliser le comportement des participants lors de la tâche sociale interactive ne soit pas réellement robuste d'une population à l'autre. Une étude antérieure a mis en évidence que l'incertitude du cadre expérimental peut gonfler l'incertitude du sujet et ainsi rendre la modélisation du comportement moins fiable (Daunizeau et al., 2010). Ainsi, l'incertitude quant à l'efficacité de la manipulation du contexte social susmentionnée pourrait être un facteur de confusion qui a pu biaiser nos résultats. On pourrait également avancer que les conditions de la tâche expérimentale n'étaient pas assez claires et ont donc incité les participants à se comporter de manière moins précise (c'est-à-dire de manière incertaine quant à la "bonne" manière d'agir ou de répondre) et a donc rendu la modélisation de leur comportement plus homogène, non seulement à travers le contexte, mais aussi à travers les groupes. Cela pourrait expliquer l'absence de différenciation en ce qui concerne les scores de sophistication et de flexibilité. L'incertitude du cadre expérimental pourrait provenir de deux facteurs : l'âge des participants (donc leur capacité à comprendre des instructions abstraites) et/ou l'ambiguïté des stimuli utilisés. Le dernier cas est possible si on pense à la tendance que les enfants ont d'anthropomorphiser les animaux. Par conséquent, bien que nous disions aux enfants qu'ils jouent contre un ordinateur dans le contexte non-social, ils ont pu attribuer des traits humains à la poule, expliquant le manque de différenciation entre les contextes dans nos résultats.

Études futures

Cette étude a tenté de reproduire la complexité des diagnostics psychiatriques souvent observés dans les contextes cliniques et a ouvert la voie à d'autres études computationnelles multi-populations sur la réciprocité sociale. Les conclusions de cet article sont destinées à servir d'orientation ou de suggestions pour les hypothèses d'études confirmatoires ultérieures. En outre, les études futures devraient tenir compte de la complexité de la réalité clinique mise en évidence dans ce mémoire et essayer de l'intégrer autant que possible lors de la détermination des critères d'inclusion/exclusion de leur échantillon. La communauté scientifique s'accorde sur le fait que la médecine de précision est une voie prometteuse dans le domaine clinique, tant au niveau de

l'évaluation que des traitements (Alda, 2013; Jameson & Longo, 2015; Manchia et al., 2020). Toutefois, il est plus compliqué d'appliquer la médecine de précision dans des populations cliniques hétérogènes et comorbides qu'avec des échantillons de recherche homogènes et clairement définis. C'est pourquoi les études futures devraient s'attarder à mieux comprendre la complexité de la réalité clinique et la manière dont les conclusions, peut-être sursimplifiées et tirées d'échantillons prototypiques, s'appliquent à des populations cliniques écologiques. Il a été suggéré, dans cette étude, que le phénotype computationnel des enfants pourrait être différent de celui des adultes. Cela pourrait être dû à l'hétérogénéité et le chevauchement de nos groupes cliniques. Des études ultérieures pourraient tenter de contrôler ce facteur (par exemple, en incluant un groupe clinique avec comorbidités et un autre sans comorbidités).

Applications cliniques

À plus long terme, la tâche du PHG pourrait être utilisée comme outil de dépistage, d'entraînement et même de stratification. D'abord, avec plus d'investigation, un corrélat constant et généralisé à toutes les populations pourrait être identifié pour permettre de distinguer les personnes autistes des autres populations. Le PHG pourrait donc être une tâche plus écologique qui serait utilisée dans les protocoles de dépistage standardisé. Par exemple, la persévérance pourrait être un corrélat potentiel suivant les résultats de la présente étude. Ensuite, en utilisant la rétroaction des essais et en ajoutant potentiellement l'information sur le type de stratégie utilisé, la tâche pourrait être utilisée comme forme d'entraînement des capacités sociales. L'entraînement social est un sujet assez étudié en autisme et sa pertinence a été établie (Islam et al., 2023; Ke & Im, 2013; Lee et al., 2023). La tâche du PHG pourrait aider à améliorer l'attribution des états mentaux des personnes autistes en fournissant de la rétroaction sur le choix que les joueurs font à chaque essai, mais aussi en indiquant le type de stratégie utilisé autant par le joueur que l'adversaire à la fin des blocs en utilisant l'inversion de modèle en temps réel. Le joueur pourrait alors comprendre pourquoi sa stratégie n'a pas été efficace et quelle stratégie il aurait dû prendre pour battre son adversaire (en fonction de la stratégie que l'adversaire a utilisé). Cela permettrait aux joueurs d'apprendre à créer des associations entre les comportements qu'ils observent et les stratégies ou les états mentaux implicites des autres. Également, des avancées technologiques en réalité mixte permettent de transposer les jeux d'interaction dans des contextes encore plus écologiques, en combinant les stimuli avec l'environnement réel du joueur. Cette nouvelle approche pourrait permettre de classer

les patients selon des compétences qui sont interprétables d'un point de vue clinique (p.ex., sensorimotrices, cognitives ou sociales; (Hafsia et al., 2022).

Il est donc important de poursuivre les études avec cette tâche pour la peaufiner et l'adapter à un plus grand nombre de populations. Cette tâche, peu coûteuse monétairement et en termes de temps, pourrait permettre aux cliniciens de rendre le dépistage de l'autisme plus efficace et d'offrir une alternative ludique aux enfants pour améliorer leurs capacités de réciprocité socio-émotionnelle.

Conclusion

Ce mémoire avait pour but d'étudier les mécanismes computationnels de la réciprocité socio-émotionnelle chez des populations pédiatriques avec et sans troubles psychiatriques. D'une part, ce mémoire avait pour but d'étendre et répliquer les résultats trouvés chez des adultes autistes et neurotypiques à une population pédopsychiatrique multidimensionnelle. D'autre part, cette étude se voulait exploratoire en investiguant le rôle potentiel des symptômes, plutôt que des catégories diagnostiques, dans les difficultés de réciprocité sociale. Les résultats chez les adultes n'ont pas été répliqués et cette étude a montré que les enfants semblent utiliser des stratégies de jeu différentes et moins sophistiquées que les adultes dans la tâche sociale interactive. De plus, les comportements de persévération dans cette tâche semblent être un bon corrélat pour identifier l'autisme dans une population pédopsychiatrique hétérogène, bien que d'autres études soient nécessaires pour le confirmer. En plus, la performance à la tâche chez les enfants au développement normal est supérieure à celle des enfants issus des groupes cliniques, ce qui semble aligné avec la littérature antérieure. De manière plus globale, ce mémoire a permis de mettre en évidence la complexité de la réalité clinique et l'importance de prendre en compte cette dernière pour arriver à des résultats qui sont généralisables et répliquables.

Références bibliographiques

- Achenbach, T. M. (2015). Achenbach System of Empirically Based Assessment (ASEBA). Dans *The Encyclopedia of Clinical Psychology* (p. 1-8). American Cancer Society. <https://doi.org/10.1002/9781118625392.wbecp150>
- Adolphs, R. (2001). The neurobiology of social cognition. *Current Opinion in Neurobiology*, *11*(2), 231-239. [https://doi.org/10.1016/S0959-4388\(00\)00202-6](https://doi.org/10.1016/S0959-4388(00)00202-6)
- Alda, M. (2013). Personalized psychiatry : Many questions, fewer answers. *Journal of Psychiatry & Neuroscience : JPN*, *38*(6), 363-365. <https://doi.org/10.1503/jpn.130221>
- Aljunied, M., & Frederickson, N. (2011). Cognitive indicators of different levels of special educational support needs in autism. *Research in Autism Spectrum Disorders*, *5*(1), 368-376. <https://doi.org/10.1016/j.rasd.2010.05.002>
- Amaral, D. G., Anderson, G. M., Bailey, A., Bernier, R., Bishop, S., Blatt, G., Canal-Bedia, R., Charman, T., Dawson, G., de Vries, P. J., Dickey-Bloom, E., Dissanayake, C., Kamio, Y., Kana, R., Khan, N. Z., Knoll, A., Kooy, F., Lainhart, J., Levitt, P., ... Whitehouse, A. (2019). Gaps in Current Autism Research : The Thoughts of the Autism Research Editorial Board and Associate Editors. *Autism Research*, *12*(5), 700-714. <https://doi.org/10.1002/aur.2101>
- American Psychiatric Association. (2013). *Diagnostic and statistical manual of mental disorders (DSM-5®)*. American Psychiatric Pub.
- Ashwood, P., Krakowiak, P., Hertz-Picciotto, I., Hansen, R., Pessah, I. N., & Van de Water, J. (2011). Associations of impaired behaviors with elevated plasma chemokines in autism spectrum disorders. *Journal of Neuroimmunology*, *232*(1-2), 196-199. <https://doi.org/10.1016/j.jneuroim.2010.10.025>
- Association, A. P. (2013). *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders (DSM-5®)*. American Psychiatric Pub.
- Baixauli-Fortea, I., Miranda Casas, A., Berenguer-Forner, C., Colomer-Diago, C., & Roselló-Miranda, B. (2019). Pragmatic competence of children with autism spectrum disorder. Impact of theory of mind, verbal working memory, ADHD symptoms, and structural language. *Applied Neuropsychology: Child*, *8*(2), 101-112. <https://doi.org/10.1080/21622965.2017.1392861>

- Ballespí, S., Vives, J., Sharp, C., Tobar, A., & Barrantes-Vidal, N. (2019). Hypermentalizing in Social Anxiety : Evidence for a Context-Dependent Relationship. *Frontiers in Psychology*, 10. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2019.01501>
- Baron-Cohen, S. (1989). The autistic child's theory of mind : A case of specific developmental delay. *Child Psychology & Psychiatry & Allied Disciplines*, 30(2), 285-297. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.1989.tb00241.x>
- Baron-Cohen, S., Leslie, A. M., & Frith, U. (1985). Does the autistic child have a "theory of mind" ? *Cognition*, 21(1), 37-46. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(85\)90022-8](https://doi.org/10.1016/0010-0277(85)90022-8)
- Baron-Cohen, S., Wheelwright, S., Hill, J., Raste, Y., & Plumb, I. (2001). The "Reading the Mind in the Eyes" Test Revised Version : A Study with Normal Adults, and Adults with Asperger Syndrome or High-functioning Autism. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 42(2), 241-251. <https://doi.org/10.1111/1469-7610.00715>
- Baron-Cohen, S., Wheelwright, S., Skinner, R., Martin, J., & Clubley, E. (2001). The autism-spectrum quotient (AQ) : Evidence from Asperger syndrome/high-functioning autism, males and females, scientists and mathematicians. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 31(1), 5-17. <https://doi.org/10.1023/a:1005653411471>
- Bauman, M. L. (2010). Medical comorbidities in autism : Challenges to diagnosis and treatment. *Neurotherapeutics*, 7(3), 320-327. <https://doi.org/10.1016/j.nurt.2010.06.001>
- Bennetto, L., Pennington, B. F., & Rogers, S. J. (1996). Intact and impaired memory functions in autism. *Child Development*, 67(4), 1816-1835.
- Birmaher, B., Brent, D. A., Chiappetta, L., Bridge, J., Monga, S., & Baugher, M. (1999). Psychometric Properties of the Screen for Child Anxiety Related Emotional Disorders (SCARED) : A Replication Study. *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, 38(10), 1230-1236. <https://doi.org/10.1097/00004583-199910000-00011>
- Birmingham, E., Johnston, K. H. S., & Iarocci, G. (2017). Spontaneous gaze selection and following during naturalistic social interactions in school-aged children and adolescents with autism spectrum disorder. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue canadienne de psychologie expérimentale*, 71(3), 243-257. <https://doi.org/10.1037/cep0000131>

- Bölte, S., Poustka, F., & Constantino, J. N. (2008). Assessing autistic traits : Cross-cultural validation of the social responsiveness scale (SRS). *Autism Research, 1*(6), 354-363. <https://doi.org/10.1002/aur.49>
- Bora, E., & Pantelis, C. (2016). Meta-analysis of social cognition in attention-deficit/hyperactivity disorder (ADHD) : Comparison with healthy controls and autistic spectrum disorder. *Psychological Medicine, 46*(4), 699-716. <https://doi.org/10.1017/S0033291715002573>
- Bottema-Beutel, K., Kapp, S. K., Lester, J. N., Sasson, N. J., & Hand, B. N. (2021). Avoiding Ableist Language : Suggestions for Autism Researchers. *Autism in Adulthood, 3*(1), 18-29. <https://doi.org/10.1089/aut.2020.0014>
- Bourke, J., de Klerk, N., Smith, T., & Leonard, H. (2016). Population-Based Prevalence of Intellectual Disability and Autism Spectrum Disorders in Western Australia. *Medicine, 95*(21), e3737. <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000003737>
- Cáceres, A. S. J., Keren, N., Booth, R., & Happé, F. (2014). Assessing Theory of Mind Nonverbally in Those With Intellectual Disability and ASD : The Penny Hiding Game. *Autism Research, 7*(5), 608-616. <https://doi.org/10.1002/aur.1405>
- Castelli, F. (2015). Mind, Theories of. Dans J. D. Wright (Éd.), *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences (Second Edition)* (p. 539-544). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097086-8.56016-4>
- Chaidez, V., Hansen, R. L., & Hertz-Picciotto, I. (2014). Gastrointestinal problems in children with autism, developmental delays or typical development. *Journal of Autism and Developmental Disorders, 44*(5), 1117-1127. <https://doi.org/10.1007/s10803-013-1973-x>
- Chandler, S., Charman, T., Baird, G., Simonoff, E., Loucas, T., Meldrum, D., Scott, M., & Pickles, A. (2007). Validation of the Social Communication Questionnaire in a Population Cohort of Children With Autism Spectrum Disorders. *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry, 46*(10), 1324-1332. <https://doi.org/10.1097/chi.0b013e31812f7d8d>
- Chang, Y.-C., Quan, J., & Wood, J. J. (2012). Effects of Anxiety Disorder Severity on Social Functioning in Children with Autism Spectrum Disorders. *Journal of Developmental and Physical Disabilities, 24*(3), 235-245. <https://doi.org/10.1007/s10882-012-9268-2>
- Charman, T., & Campbell, A. (1997). Reliability of theory of mind task performance by individuals with a learning disability : A research note. *Journal of Child Psychology and Psychiatry,*

and Allied Disciplines, 38(6), 725-730. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.1997.tb01699.x>

- Charman, T., Jones, C. R. G., Pickles, A., Simonoff, E., Baird, G., & Happé, F. (2011). Defining the cognitive phenotype of autism. *Brain Research*, 1380, 10-21. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2010.10.075>
- Chesnut, S. R., Wei, T., Barnard-Brak, L., & Richman, D. M. (2017). A meta-analysis of the social communication questionnaire : Screening for autism spectrum disorder. *Autism*, 21(8), 920-928. <https://doi.org/10.1177/1362361316660065>
- Chevallier, C., Kohls, G., Troiani, V., Brodtkin, E. S., & Schultz, R. T. (2012). The social motivation theory of autism. *Trends in Cognitive Sciences*, 16(4), 231-239. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2012.02.007>
- Conner, C. M., Cramer, R. D., & McGonigle, J. J. (2019). Examining the Diagnostic Validity of Autism Measures Among Adults in an Outpatient Clinic Sample. *Autism in Adulthood*, 1(1), 60-68. <https://doi.org/10.1089/aut.2018.0023>
- Conners, C. K., Pitkanen, J., & Rzepa, S. R. (2011). Conners 3rd Edition (Conners 3; Conners 2008). Dans J. S. Kreutzer, J. DeLuca, & B. Caplan (Éds.), *Encyclopedia of Clinical Neuropsychology* (p. 675-678). Springer. https://doi.org/10.1007/978-0-387-79948-3_1534
- Constantino, J. N. (2013). Social Responsiveness Scale. Dans F. R. Volkmar (Éd.), *Encyclopedia of Autism Spectrum Disorders* (p. 2919-2929). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1698-3_296
- Constantino, J. N., Davis, S. A., Todd, R. D., Schindler, M. K., Gross, M. M., Brophy, S. L., Metzger, L. M., Shoushtari, C. S., Splinter, R., & Reich, W. (2003). Validation of a Brief Quantitative Measure of Autistic Traits : Comparison of the Social Responsiveness Scale with the Autism Diagnostic Interview-Revised. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 33(4), 427-433. <https://doi.org/10.1023/A:1025014929212>
- Craig, A. B., Grossman, E., & Krichmar, J. L. (2017). Investigation of autistic traits through strategic decision-making in games with adaptive agents. *Scientific Reports*, 7(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-05933-6>
- Crompton, C. J., Hallett, S., Ropar, D., Flynn, E., & Fletcher-Watson, S. (2020). 'I never realised everybody felt as happy as I do when I am around autistic people' : A thematic analysis of

- autistic adults' relationships with autistic and neurotypical friends and family. *Autism*, 24(6), 1438-1448. <https://doi.org/10.1177/1362361320908976>
- Crompton, C. J., Ropar, D., Evans-Williams, C. V., Flynn, E. G., & Fletcher-Watson, S. (2020). Autistic peer-to-peer information transfer is highly effective. *Autism*, 24(7), 1704-1712. <https://doi.org/10.1177/1362361320919286>
- Cross, L., Piovesan, A., & Atherton, G. (2022). Autistic people outperform neurotypicals in a cartoon version of the Reading the Mind in the Eyes. *Autism Research*, 15, 1603-1608. <https://doi.org/10.1002/aur.2782>
- Daunizeau, J. (2018). The variational Laplace approach to approximate Bayesian inference. *arXiv:1703.02089 [q-bio, stat]*. <http://arxiv.org/abs/1703.02089>
- Daunizeau, J., Adam, V., & Rigoux, L. (2014). VBA : A Probabilistic Treatment of Nonlinear Models for Neurobiological and Behavioural Data. *PLOS Computational Biology*, 10(1), e1003441. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1003441>
- Daunizeau, J., Friston, K. J., & Kiebel, S. J. (2009). Variational Bayesian identification and prediction of stochastic nonlinear dynamic causal models. *Physica D. Nonlinear Phenomena*, 238(21), 2089-2118. <https://doi.org/10.1016/j.physd.2009.08.002>
- Daunizeau, J., Ouden, H. E. M. den, Pessiglione, M., Kiebel, S. J., Stephan, K. E., & Friston, K. J. (2010). Observing the Observer (I) : Meta-Bayesian Models of Learning and Decision-Making. *PLOS ONE*, 5(12), e15554. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0015554>
- DeSousa, D. A., Salum, G. A., Isolan, L. R., & Manfro, G. G. (2013). Sensitivity and Specificity of the Screen for Child Anxiety Related Emotional Disorders (SCARED) : A Community-Based Study. *Child Psychiatry & Human Development*, 44(3), 391-399. <https://doi.org/10.1007/s10578-012-0333-y>
- Devaine, M., Hollard, G., & Daunizeau, J. (2014a). The Social Bayesian Brain : Does Mentalizing Make a Difference When We Learn? *PLoS Computational Biology*, 10(12). <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1003992>
- Devaine, M., Hollard, G., & Daunizeau, J. (2014b). Theory of Mind : Did Evolution Fool Us? *PLOS ONE*, 9(2), e87619. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0087619>
- Devaine, M., San-Galli, A., Trapanese, C., Bardino, G., Hano, C., Jalme, M. S., Bouret, S., Masi, S., & Daunizeau, J. (2017). Reading wild minds : A computational assay of Theory of Mind

- sophistication across seven primate species. *PLOS Computational Biology*, 13(11), e1005833. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1005833>
- Diaconescu, A. O., Mathys, C., Weber, L. A. E., Daunizeau, J., Kasper, L., Lomakina, E. I., Fehr, E., & Stephan, K. E. (2014). Inferring on the Intentions of Others by Hierarchical Bayesian Learning. *PLOS Computational Biology*, 10(9), e1003810. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1003810>
- Donders, J. (2002). The Behavior Rating Inventory of Executive Function : Introduction. *Child Neuropsychology*, 8(4), 229-230. <https://doi.org/10.1076/chin.8.4.229.13508>
- Duarte, C. S., Bordin, I. A. S., Oliveira, A. de, & Bird, H. (2003). The CBCL and the Identification of Children with Autism and Related Conditions in Brazil : Pilot Findings. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 33(6), 703-707. <https://doi.org/10.1023/B:JADD.0000006005.31818.1c>
- Dyck, M. J., Ferguson, K., & Shochet, I. M. (2001). Do autism spectrum disorders differ from each other and from non-spectrum disorders on emotion recognition tests? *European Child & Adolescent Psychiatry*, 10(2), 105-116. <https://doi.org/10.1007/s007870170033>
- Eigsti, I.-M., & Irvine, C. A. (2021). Verbal mediation of theory of mind in verbal adolescents with autism spectrum disorder. *Language Acquisition: A Journal of Developmental Linguistics*, 28(2), 195-213. <https://doi.org/10.1080/10489223.2021.1877705>
- Factor, R. S., Ryan, S. M., Farley, J. P., Ollendick, T. H., & Scarpa, A. (2017). Does the Presence of Anxiety and ADHD Symptoms Add to Social Impairment in Children with Autism Spectrum Disorder? *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 47(4), 1122-1134. <https://doi.org/10.1007/s10803-016-3025-9>
- Fekar Gharamaleki, F., Bahrami, B., & Masumi, J. (2021). Autism screening tests : A narrative review. *Journal of Public Health Research*, 11(1), 2308. <https://doi.org/10.4081/jphr.2021.2308>
- Felisberti, F. M., & King, R. (2017). Mind-Reading in Altruists and Psychopaths. Dans A. Ibáñez, L. Sedeño, & A. M. García (Éds.), *Neuroscience and Social Science : The Missing Link* (p. 121-140). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68421-5_6
- Ferguson, J. L., Leaf, J. A., Cihon, J. H., Milne, C. M., Leaf, J. B., McEachin, J., & Leaf, R. (2020). Practical Functional Assessment : A Case Study Replication and Extension with a Child

- Diagnosed with Autism Spectrum Disorder. *Education and Treatment of Children*, 43(2), 171-185. <https://doi.org/10.1007/s43494-020-00015-1>
- Fitch, W. T., Huber, L., & Bugnyar, T. (2010). Social Cognition and the Evolution of Language : Constructing Cognitive Phylogenies. *Neuron*, 65(6), 795-814. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2010.03.011>
- Fitzpatrick, P., Frazier, J. A., Cochran, D., Mitchell, T., Coleman, C., & Schmidt, R. C. (2018). Relationship between theory of mind, emotion recognition, and social synchrony in adolescents with and without autism. *Frontiers in Psychology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.01337>
- Forgeot d'Arc, B., Devaine, M., & Daunizeau, J. (2020). Social behavioural adaptation in Autism. *PLoS Computational Biology*, 16(3). <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1007700>
- Frigaux, A., Evrard, R., & Lighezzolo-Alnot, J. (2019). L'ADI-R et l'ADOS face au diagnostic différentiel des troubles du spectre autistique : Intérêts, limites et ouvertures. *L'Encéphale*, 45(5), 441-448. <https://doi.org/10.1016/j.encep.2019.07.002>
- Friston, K., Mattout, J., Trujillo-Barreto, N., Ashburner, J., & Penny, W. (2007). Variational free energy and the Laplace approximation. *NeuroImage*, 34(1), 220-234. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2006.08.035>
- Frith, C. D. (2007). The social brain? *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 362(1480), 671-678. <https://doi.org/10.1098/rstb.2006.2003>
- Frith, U. (1994). Autism and theory of mind in everyday life. *Social Development*, 3(2), 108-124. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9507.1994.tb00031.x>
- Fu, I.-N., Chen, K.-L., Liu, M.-R., Jiang, D.-R., Hsieh, C.-L., & Lee, S.-C. (2023). A systematic review of measures of theory of mind for children. *Developmental Review*, 67, 101061. <https://doi.org/10.1016/j.dr.2022.101061>
- Fulton, E., Eapen, V., Črnčec, R., Walter, A., & Rogers, S. (2014). Reducing Maladaptive Behaviors in Preschool-Aged Children with Autism Spectrum Disorder Using the Early Start Denver Model. *Frontiers in Pediatrics*, 2. <https://doi.org/10.3389/fped.2014.00040>
- Ghaziuddin, M., Welch, K., Mohiuddin, S., Lagrou, R., & Ghaziuddin, N. (2010). Utility of the Social and Communication Questionnaire in the Differentiation of Autism from ADHD. *Journal of Developmental and Physical Disabilities*, 22(4), 359-366. <https://doi.org/10.1007/s10882-010-9199-8>

- Girli, A., & Tekin, D. (2010). Investigating false belief levels of typically developed children and children with autism. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2(2), 1944-1950. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2010.03.261>
- Gotham, K., Pickles, A., & Lord, C. (2009). Standardizing ADOS scores for a measure of severity in autism spectrum disorders. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 39(5), 693-705. <https://doi.org/10.1007/s10803-008-0674-3>
- Grant, C. M., Grayson, A., & Boucher, J. (2001). Using Tests of False Belief with Children with Autism: How Valid and Reliable are they? *Autism*, 5(2), 135-145. <https://doi.org/10.1177/1362361301005002004>
- Gratch, G. (1964). Response Alternation in Children: A Developmental Study of Orientations to Uncertainty. *Human Development*, 7(1), 49-60. <https://doi.org/10.1159/000270053>
- Green, M. F., Penn, D. L., Bentall, R., Carpenter, W. T., Gaebel, W., Gur, R. C., Kring, A. M., Park, S., Silverstein, S. M., & Heinssen, R. (2008). Social Cognition in Schizophrenia: An NIMH Workshop on Definitions, Assessment, and Research Opportunities. *Schizophrenia Bulletin*, 34(6), 1211-1220. <https://doi.org/10.1093/schbul/sbm145>
- Hafsia, M., Trachel, R., & Dumas, G. (2022, octobre 21). *Towards Clinical Phenotyping at Scale with Serious Games in Mixed Reality*. Empowering Communities: A Participatory Approach to AI for Mental Health. <https://openreview.net/forum?id=PmbeaorKxCF>
- Haker, H., Schneebeli, M., & Stephan, K. E. (2016). Can Bayesian Theories of Autism Spectrum Disorder Help Improve Clinical Practice? *Frontiers in Psychiatry*, 7, 107. <https://doi.org/10.3389/fpsy.2016.00107>
- Hamilton, A. F. de C., Brindley, R. M., & Frith, U. (2007). Imitation and action understanding in autistic spectrum disorders: How valid is the hypothesis of a deficit in the mirror neuron system? *Neuropsychologia*, 45(8), 1859-1868. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2006.11.022>
- Hampton, A. N., Bossaerts, P., & O'Doherty, J. P. (2008). Neural correlates of mentalizing-related computations during strategic interactions in humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(18), 6741-6746. <https://doi.org/10.1073/pnas.0711099105>
- Happé, F., & Frith, U. (2006). The Weak Coherence Account: Detail-focused Cognitive Style in Autism Spectrum Disorders. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 36(1), 5-25. <https://doi.org/10.1007/s10803-005-0039-0>

- Happé, F. G. E. (1995). The Role of Age and Verbal Ability in the Theory of Mind Task Performance of Subjects with Autism. *Child Development*, 66(3), 843-855. <https://doi.org/10.2307/1131954>
- Henco, L., & Schilbach, L. (2021). Studying Social Inferences in and Across Social Brains. *Biological Psychiatry: Cognitive Neuroscience and Neuroimaging*, 6(8), 760-761. <https://doi.org/10.1016/j.bpsc.2021.04.008>
- Hezel, D. M., & McNally, R. J. (2014). Theory of Mind Impairments in Social Anxiety Disorder. *Behavior Therapy*, 45(4), 530-540. <https://doi.org/10.1016/j.beth.2014.02.010>
- Higgins, W. C., Ross, R. M., Polito, V., & Kaplan, D. M. (2023). Three threats to the validity of the Reading the Mind in the Eyes Test : A commentary on Pavlova and Sokolov (2022). *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 147. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2023.105088>
- House, B., Henrich, J., Sarnecka, B., & Silk, J. B. (2013). The development of contingent reciprocity in children. *Evolution and Human Behavior*, 34(2), 86-93. <https://doi.org/10.1016/j.evolhumbehav.2012.10.001>
- Huerta, M., & Lord, C. (2012). Diagnostic Evaluation of Autism Spectrum Disorders. *Pediatric Clinics*, 59(1), 103-111. <https://doi.org/10.1016/j.pcl.2011.10.018>
- Hus, V., Bishop, S., Gotham, K., Huerta, M., & Lord, C. (2013). Factors influencing scores on the social responsiveness scale. *Journal of Child Psychology and Psychiatry, and Allied Disciplines*, 54(2), 216-224. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.2012.02589.x>
- Islam, Md. A., Hasan, M. M., & Deowan, S. A. (2023). Robot-Assisted Training for Children with Autism Spectrum Disorder : A Review. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 108(3), 41. <https://doi.org/10.1007/s10846-023-01872-9>
- Jameson, J. L., & Longo, D. L. (2015). Precision Medicine—Personalized, Problematic, and Promising. *New England Journal of Medicine*, 372(23), 2229-2234. <https://doi.org/10.1056/NEJMSb1503104>
- Jervis, N., & Baker, M. (2004). Clinical and Research Implications of an Investigation into Theory of Mind (TOM) Task Performance in Children and Adults with Non-specific Intellectual Disabilities. *Journal of Applied Research in Intellectual Disabilities*, 17(1), 49-57. <https://doi.org/10.1111/j.1468-3148.2004.00172.x>

- Johnson, B. N., Kivity, Y., Rosenstein, L. K., LeBreton, J. M., & Levy, K. N. (2022). The association between mentalizing and psychopathology : A meta-analysis of the reading the mind in the eyes task across psychiatric disorders. *Clinical Psychology: Science and Practice*, 29, 423-439. <https://doi.org/10.1037/cps0000105>
- Joyce, J. (2019). Bayes' Theorem. Dans E. N. Zalta (Éd.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Spring 2019). Metaphysics Research Lab, Stanford University. <https://plato.stanford.edu/archives/spr2019/entries/bayes-theorem/>
- Kalyva, E., Kyriazi, M., Vargiami, E., & Zafeiriou, D. I. (2016). A review of co-occurrence of autism spectrum disorder and Tourette syndrome. *Research in Autism Spectrum Disorders*, 24, 39-51. <https://doi.org/10.1016/j.rasd.2016.01.007>
- Kamp-Becker, I., Schröder, J., Muehlan, H., Remschmidt, H., Becker, K., & Bachmann, C. J. (2011). Health-Related Quality of Life in Children and Adolescents with Autism Spectrum Disorder. *Zeitschrift für Kinder- und Jugendpsychiatrie und Psychotherapie*, 39(2), 123-131. <https://doi.org/10.1024/1422-4917/a000098>
- Kao, G. S., & Thomas, H. M. (2010). Test Review : C. Keith Conners Conners 3rd Edition Toronto, Ontario, Canada: Multi-Health Systems, 2008: *Journal of Psychoeducational Assessment*. <https://doi.org/10.1177/0734282909360011>
- Kaufmann, W. E., Kidd, S. A., Andrews, H. F., Budimirovic, D. B., Esler, A., Haas-Givler, B., Stackhouse, T., Riley, C., Peacock, G., Sherman, S. L., Brown, W. T., & Berry-Kravis, E. (2017). Autism Spectrum Disorder in Fragile X Syndrome : Cooccurring Conditions and Current Treatment. *Pediatrics*, 139(Suppl 3), S194-S206. <https://doi.org/10.1542/peds.2016-1159F>
- Ke, F., & Im, T. (2013). Virtual-Reality-Based Social Interaction Training for Children with High-Functioning Autism. *The Journal of Educational Research*, 106(6), 441-461. <https://doi.org/10.1080/00220671.2013.832999>
- Kendall, P. C., Puliafico, A. C., Barmish, A. J., Choudhury, M. S., Henin, A., & Treadwell, K. S. (2007). Assessing anxiety with the Child Behavior Checklist and the Teacher Report Form. *Journal of Anxiety Disorders*, 21(8), 1004-1015. <https://doi.org/10.1016/j.janxdis.2006.10.012>

- Kim, S. H. (Sophy), Hus, V., & Lord, C. (2013). Autism Diagnostic Interview-Revised. Dans F. R. Volkmar (Éd.), *Encyclopedia of Autism Spectrum Disorders* (p. 345-349). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1698-3_894
- Kishida, K. T., Li, J., Schwind, J., & Montague, P. R. (2012). New approaches to investigating social gestures in autism spectrum disorder. *Journal of Neurodevelopmental Disorders*, 4(1), 14. <https://doi.org/10.1186/1866-1955-4-14>
- Klin, A., Jones, W., Schultz, R., & Volkmar, F. (2003). The enactive mind, or from actions to cognition : Lessons from autism. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 358(1430), 345-360. <https://doi.org/10.1098/rstb.2002.1202>
- Koivumäki, K., & Wilkinson, C. (2020). Exploring the intersections : Researchers and communication professionals' perspectives on the organizational role of science communication. *Journal of Communication Management*, 24(3), 207-226. <https://doi.org/10.1108/JCOM-05-2019-0072>
- Kouklari, E.-C., Tsermentseli, S., & Auyeung, B. (2018). Executive function predicts theory of mind but not social verbal communication in school-aged children with autism spectrum disorder. *Research in Developmental Disabilities*, 76, 12-24. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2018.02.015>
- Lee, J. H., Lee, T. S., Yoo, S. Y., Lee, S. W., Jang, J. H., Choi, Y. jin, & Park, Y. R. (2023). Metaverse-based social skills training programme for children with autism spectrum disorder to improve social interaction ability : An open-label, single-centre, randomised controlled pilot trial. *EClinicalMedicine*, 61. <https://doi.org/10.1016/j.eclinm.2023.102072>
- Leslie, A. M., & Frith, U. (1988). Autistic children's understanding of seeing, knowing and believing. *British Journal of Developmental Psychology*, 6(4), 315-324. <https://doi.org/10.1111/j.2044-835X.1988.tb01104.x>
- Levi-Shachar, O., Gvirts, H. Z., Goldwin, Y., Bloch, Y., Shamay-Tsoory, S., Boyle, D., & Maoz, H. (2021). The association between symptom severity and theory of mind impairment in children with attention deficit/hyperactivity disorder. *Psychiatry Research*, 303. <https://doi.org/10.1016/j.psychres.2021.114092>
- Lord, C., Risi, S., Lambrecht, L., Cook, E. H., Leventhal, B. L., DiLavore, P. C., Pickles, A., & Rutter, M. (2000). The Autism Diagnostic Observation Schedule—Generic : A Standard Measure of Social and Communication Deficits Associated with the Spectrum of Autism.

Journal of Autism and Developmental Disorders, 30(3), 205-223.
<https://doi.org/10.1023/A:1005592401947>

- Lord, C., Rutter, M., & Le Couteur, A. (1994). Autism Diagnostic Interview-Revised : A revised version of a diagnostic interview for caregivers of individuals with possible pervasive developmental disorders. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 24(5), 659-685.
<https://doi.org/10.1007/BF02172145>
- Loth, E., Ahmad, J., Chatham, C., López, B., Carter, B., Crawley, D., Oakley, B., Hayward, H., Cooke, J., Cáceres, A. S. J., Bzdok, D., Jones, E., Charman, T., Beckmann, C., Bourgeron, T., Toro, R., Buitelaar, J., Murphy, D., & Dumas, G. (2021). The meaning of significant mean group differences for biomarker discovery. *PLOS Computational Biology*, 17(11), e1009477. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1009477>
- Luckett, T., Powell, S. D., Messer, D. J., Thornton, M. E., & Schulz, J. (2002). Do Children with Autism Who Pass False Belief Tasks Understand the Mind as Active Interpreter? *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 32(2), 127-140.
<https://doi.org/10.1023/A:1014844722931>
- Lugo-Marín, J., Magán-Maganto, M., Rivero-Santana, A., Cuellar-Pompa, L., Alviani, M., Jenaro-Rio, C., Díez, E., & Canal-Bedia, R. (2019). Prevalence of psychiatric disorders in adults with autism spectrum disorder : A systematic review and meta-analysis. *Research in Autism Spectrum Disorders*, 59, 22-33. <https://doi.org/10.1016/j.rasd.2018.12.004>
- Luyster, R., Gotham, K., Guthrie, W., Coffing, M., Petrak, R., Pierce, K., Bishop, S., Esler, A., Hus, V., Oti, R., Richler, J., Risi, S., & Lord, C. (2009). The Autism Diagnostic Observation Schedule – Toddler Module : A new module of a standardized diagnostic measure for autism spectrum disorders. *Journal of autism and developmental disorders*, 39(9), 1305-1320. <https://doi.org/10.1007/s10803-009-0746-z>
- Maenner, M. J. (2023). Prevalence and Characteristics of Autism Spectrum Disorder Among Children Aged 8 Years—Autism and Developmental Disabilities Monitoring Network, 11 Sites, United States, 2020. *MMWR. Surveillance Summaries*, 72. <https://doi.org/10.15585/mmwr.ss7202a1>
- Maes, J. H. R., Eling, P. A. T. M., Wezenberg, E., Vissers, C. Th. W. M., & Kan, C. C. (2011). Attentional set shifting in autism spectrum disorder : Differentiating between the role of perseveration, learned irrelevance, and novelty processing. *Journal of Clinical and*

Experimental Neuropsychology, 33(2), 210-217.
<https://doi.org/10.1080/13803395.2010.501327>

- Mahajan, R., Bernal, M. P., Panzer, R., Whitaker, A., Roberts, W., Handen, B., Hardan, A., Anagnostou, E., Veenstra-VanderWeele, J., & Autism Speaks Autism Treatment Network Psychopharmacology Committee. (2012). Clinical practice pathways for evaluation and medication choice for attention-deficit/hyperactivity disorder symptoms in autism spectrum disorders. *Pediatrics*, 130 Suppl 2, S125-138. <https://doi.org/10.1542/peds.2012-0900J>
- Manchia, M., Pisanu, C., Squassina, A., & Carpiniello, B. (2020). Challenges and Future Prospects of Precision Medicine in Psychiatry. *Pharmacogenomics and Personalized Medicine*, 13, 127-140. <https://doi.org/10.2147/PGPM.S198225>
- Martins-Junior, F. E., Sanvicente-Vieira, B., Grassi-Oliveira, R., & Brietzke, E. (2011). Social cognition and Theory of Mind: Controversies and promises for understanding major psychiatric disorders. *Psychology & Neuroscience*, 4(3), 347. <https://doi.org/10.3922/j.psns.2011.3.008>
- Masi, A., DeMayo, M. M., Glozier, N., & Guastella, A. J. (2017). An Overview of Autism Spectrum Disorder, Heterogeneity and Treatment Options. *Neuroscience Bulletin*, 33(2), 183-193. <https://doi.org/10.1007/s12264-017-0100-y>
- Matson, J. L., & Shoemaker, M. (2009). Intellectual disability and its relationship to autism spectrum disorders. *Research in Developmental Disabilities*, 30(6), 1107-1114. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2009.06.003>
- Mayes, L. C., Klin, A., Tercyak, K. P., Cicchetti, D. V., & Cohen, D. J. (1996). Test-retest reliability for false-belief tasks. *Journal of Child Psychology and Psychiatry, and Allied Disciplines*, 37(3), 313-319. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.1996.tb01408.x>
- Mazefsky, C. A., Anderson, R., Conner, C. M., & Minshew, N. (2011). Child Behavior Checklist Scores for School-Aged Children with Autism: Preliminary Evidence of Patterns Suggesting the Need for Referral. *Journal of Psychopathology and Behavioral Assessment*, 33(1), 31-37. <https://doi.org/10.1007/s10862-010-9198-1>
- Miranda, A., Berenguer, C., Roselló, B., Baixauli, I., & Colomer, C. (2017). Social Cognition in Children with High-Functioning Autism Spectrum Disorder and Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder. Associations with Executive Functions. *Frontiers in Psychology*, 8. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2017.01035>

- Monga, S., Birmaher, B., Chiappetta, L., Brent, D., Kaufman, J., Bridge, J., & Cully, M. (2000). Screen for child anxiety-related emotional disorders (SCARED): Convergent and divergent validity. *Depression and Anxiety, 12*(2), 85-91. [https://doi.org/10.1002/1520-6394\(2000\)12:2<85::AID-DA4>3.0.CO;2-2](https://doi.org/10.1002/1520-6394(2000)12:2<85::AID-DA4>3.0.CO;2-2)
- Moody, E. J., Reyes, N., Ledbetter, C., Wiggins, L., DiGuseppi, C., Alexander, A., Jackson, S., Lee, L.-C., Levy, S. E., & Rosenberg, S. A. (2017). Screening for Autism with the SRS and SCQ : Variations across Demographic, Developmental and Behavioral Factors in Preschool Children. *Journal of Autism and Developmental Disorders, 47*(11), 3550-3561. <https://doi.org/10.1007/s10803-017-3255-5>
- Morrison, K. E., DeBrabander, K. M., Jones, D. R., Faso, D. J., Ackerman, R. A., & Sasson, N. J. (2020). Outcomes of real-world social interaction for autistic adults paired with autistic compared to typically developing partners. *Autism, 24*(5), 1067-1080. <https://doi.org/10.1177/1362361319892701>
- Na, S., Rhoads, S. A., Yu, A. N. C., Fiore, V. G., & Gu, X. (2023). Towards a neurocomputational account of social controllability : From models to mental health. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews, 148*, 105139. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2023.105139>
- Nowak, M., & Sigmund, K. (1993). A strategy of win-stay, lose-shift that outperforms tit-for-tat in the Prisoner's Dilemma game. *Nature, 364*(6432), Article 6432. <https://doi.org/10.1038/364056a0>
- Oakley, B. F. M., Brewer, R., Bird, G., & Catmur, C. (20160808). Theory of mind is not theory of emotion : A cautionary note on the Reading the Mind in the Eyes Test. *Journal of Abnormal Psychology, 125*(6), 818. <https://doi.org/10.1037/abn0000182>
- Oliver, B., Dale, P., Saudino, K., Petrill, S., Pike, A., & Plomin, R. (2002). The Validity of a Parent-based Assessment of Cognitive Abilities in Three-year Olds*. *Early Child Development and Care, 172*(4), 337-348. <https://doi.org/10.1080/03004430212713>
- Oswald, D. P., & Ollendick, T. H. (1989). Role taking and social competence in autism and mental retardation. *Journal of Autism and Developmental Disorders, 19*(1), 119-127. <https://doi.org/10.1007/BF02212723>
- Ousley, O., & Cermak, T. (2014). Autism Spectrum Disorder : Defining Dimensions and Subgroups. *Current Developmental Disorders Reports, 1*(1), 20-28. <https://doi.org/10.1007/s40474-013-0003-1>

- Palmer, C. J., Lawson, R. P., & Hohwy, J. (20170323). Bayesian approaches to autism : Towards volatility, action, and behavior. *Psychological Bulletin*, 143(5), 521. <https://doi.org/10.1037/bul0000097>
- Palminteri, S., Kilford, E. J., Coricelli, G., & Blakemore, S.-J. (2016). The Computational Development of Reinforcement Learning during Adolescence. *PLoS Computational Biology*, 12(6), e1004953. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1004953>
- Perner, J., & Wimmer, H. (1985). “John thinks that Mary thinks that...” attribution of second-order beliefs by 5- to 10-year-old children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 39(3), 437-471. [https://doi.org/10.1016/0022-0965\(85\)90051-7](https://doi.org/10.1016/0022-0965(85)90051-7)
- Premack, D., & Woodruff, G. (1978). Does the chimpanzee have a theory of mind? *Behavioral and Brain Sciences*, 1(4), 515-526. <https://doi.org/10.1017/S0140525X00076512>
- Prior, M. (2003). Is there an increase in the prevalence of autism spectrum disorders? *Journal of Paediatrics and Child Health*, 39(2), 81-82. <https://doi.org/10.1046/j.1440-1754.2003.00097.x>
- Prior, M., Dahlstrom, B., & Squires, T.-L. (1990). Autistic children’s knowledge of thinking and feeling states in other people. *Child Psychology & Psychiatry & Allied Disciplines*, 31(4), 587-601. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.1990.tb00799.x>
- Prior, M., & Hoffmann, W. (1990). Brief report : Neuropsychological testing of autistic children through an exploration with frontal lobe tests. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 20(4), 581-590. <https://doi.org/10.1007/BF02216063>
- Rabot, J., Rødgaard, E.-M., Jooper, R., Dumas, G., Bzdok, D., Bernhardt, B., Jacquemont, S., & Mottron, L. (2023). Genesis, modelling and methodological remedies to autism heterogeneity. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 105201. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2023.105201>
- Randall, M., Egberts, K. J., Samtani, A., Scholten, R. J., Hooft, L., Livingstone, N., Sterling-Levis, K., Woolfenden, S., & Williams, K. (2018). Diagnostic tests for autism spectrum disorder (ASD) in preschool children. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 7. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD009044.pub2>
- Rescorla, R., & Wagner, A. (1972). A theory of Pavlovian conditioning : Variations in the effectiveness of reinforcement and nonreinforcement. Dans *Classical Conditioning II: Current Research and Theory: Vol. Vol. 2*.

- Richdale, A. L., & Schreck, K. A. (2009). Sleep problems in autism spectrum disorders : Prevalence, nature, & possible biopsychosocial aetiologies. *Sleep Medicine Reviews, 13*(6), 403-411. <https://doi.org/10.1016/j.smr.2009.02.003>
- Rigoux, L., Stephan, K. E., Friston, K. J., & Daunizeau, J. (2014). Bayesian model selection for group studies—Revisited. *NeuroImage, 84*, 971-985. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.08.065>
- Ristic, J., Mottron, L., Friesen, C. K., Iarocci, G., Burack, J. A., & Kingstone, A. (2005). Eyes are special but not for everyone : The case of autism. *Cognitive Brain Research, 24*(3), 715-718. <https://doi.org/10.1016/j.cogbrainres.2005.02.007>
- Ronald, A., Happé, F., Bolton, P., Butcher, L. M., Price, T. S., Wheelwright, S., Baron-Cohen, S., & Plomin, R. (2006). Genetic heterogeneity between the three components of the autism spectrum : A twin study. *Journal of the American Academy of Child and Adolescent Psychiatry, 45*(6), 691-699. <https://doi.org/10.1097/01.chi.0000215325.13058.9d>
- Rusch, T., Steixner-Kumar, S., Doshi, P., Spezio, M., & Gläscher, J. (2020). Theory of mind and decision science : Towards a typology of tasks and computational models. *Neuropsychologia, 146*, 107488. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2020.107488>
- Rutter, M. (2003). Social communication questionnaire. (*No Title*). <https://cir.nii.ac.jp/crid/1370285712560901636>
- Sally, D., & Hill, E. (2006). The development of interpersonal strategy : Autism, theory-of-mind, cooperation and fairness. *Journal of Economic Psychology, 27*(1), 73-97. <https://doi.org/10.1016/j.joep.2005.06.015>
- Schilbach, L. (2016). Towards a second-person neuropsychiatry. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 371*(1686), 20150081. <https://doi.org/10.1098/rstb.2015.0081>
- Schug, J., Takagishi, H., Benech, C., & Okada, H. (2016). The Development of Theory of Mind and Positive and Negative Reciprocity in Preschool Children. *Frontiers in Psychology, 7*. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00888>
- Schwartz, L., Beamish, W., & McKay, L. (2021). Understanding Social-Emotional Reciprocity in Autism : Viewpoints Shared by Teachers. *Australian Journal of Teacher Education, 46*(1). <https://doi.org/10.14221/ajte.2021v46n1.2>

- Sebastián-Enesco, C., & Warneken, F. (2015). The shadow of the future : 5-year-olds, but not 3-year-olds, adjust their sharing in anticipation of reciprocation. *Journal of Experimental Child Psychology*, *129*, 40-54. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2014.08.007>
- Sevgi, M., Diaconescu, A. O., Henco, L., Tittgemeyer, M., & Schilbach, L. (2020). Social Bayes : Using Bayesian Modeling to Study Autistic Trait-Related Differences in Social Cognition. *Biological Psychiatry*, *87*(2), 185-193. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2019.09.032>
- Simonoff, E., Pickles, A., Charman, T., Chandler, S., Loucas, T., & Baird, G. (2008). Psychiatric Disorders in Children With Autism Spectrum Disorders : Prevalence, Comorbidity, and Associated Factors in a Population-Derived Sample. *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, *47*(8), 921-929. <https://doi.org/10.1097/CHI.0b013e318179964f>
- Sivaratnam, C. S., Cornish, K., Gray, K. M., Howlin, P., & Rinehart, N. J. (2012). Brief Report : Assessment of the Social-Emotional Profile in Children with Autism Spectrum Disorders using a Novel Comic Strip Task. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, *42*(11), 2505-2512. <https://doi.org/10.1007/s10803-012-1498-8>
- Skuse, D. H., & Gallagher, L. (2011). Genetic Influences on Social Cognition. *Pediatric Research*, *69*(8), Article 8. <https://doi.org/10.1203/PDR.0b013e318212f562>
- Skyrms, B. (2003). *The Stag Hunt and the Evolution of Social Structure*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139165228>
- Sodian, B., & Kristen, S. (2015). Theory of Mind During Infancy and Early Childhood Across Cultures, Development of. Dans J. D. Wright (Éd.), *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences (Second Edition)* (p. 268-273). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097086-8.23077-8>
- Sokolova, E., Oerlemans, A. M., Rommelse, N. N., Groot, P., Hartman, C. A., Glennon, J. C., Claassen, T., Heskes, T., & Buitelaar, J. K. (2017). A Causal and Mediation Analysis of the Comorbidity Between Attention Deficit Hyperactivity Disorder (ADHD) and Autism Spectrum Disorder (ASD). *Journal of Autism and Developmental Disorders*, *47*(6), 1595-1604. <https://doi.org/10.1007/s10803-017-3083-7>
- Sprenger, L., Bühler, E., Poustka, L., Bach, C., Heinzl-Gutenbrunner, M., Kamp-Becker, I., & Bachmann, C. (2013). Impact of ADHD symptoms on autism spectrum disorder symptom

- severity. *Research in Developmental Disabilities*, 34(10), 3545-3552. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2013.07.028>
- Stephan, K. E., Penny, W. D., Daunizeau, J., Moran, R. J., & Friston, K. J. (2009). Bayesian model selection for group studies. *NeuroImage*, 46(4), 1004-1017. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.03.025>
- Stone, V. E., Baron-Cohen, S., & Knight, R. T. (1998). Frontal lobe contributions to theory of mind. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 10(5), 640-656. <https://doi.org/10.1162/089892998562942>
- Takagishi, H., Kameshima, S., Schug, J., Koizumi, M., & Yamagishi, T. (2010). Theory of mind enhances preference for fairness. *Journal of Experimental Child Psychology*, 105(1-2), 130-137. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2009.09.005>
- Takagishi, H., Koizumi, M., Fujii, T., Schug, J., Kameshima, S., & Yamagishi, T. (2014). The Role of Cognitive and Emotional Perspective Taking in Economic Decision Making in the Ultimatum Game. *PLOS ONE*, 9(9), e108462. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0108462>
- Taylor, M. J., Charman, T., Robinson, E. B., Plomin, R., Happé, F., Asherson, P., & Ronald, A. (2013). Developmental associations between traits of autism spectrum disorder and attention deficit hyperactivity disorder : A genetically informative, longitudinal twin study. *Psychological Medicine*, 43(8), 1735-1746. <https://doi.org/10.1017/S003329171200253X>
- Thurm, A., Farmer, C., Salzman, E., Lord, C., & Bishop, S. (2019). State of the Field : Differentiating Intellectual Disability From Autism Spectrum Disorder. *Frontiers in Psychiatry*, 10. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsy.2019.00526>
- Torenvliet, C., Groenman, A. P., Radhoe, T. A., Agelink van Rentergem, J. A., Van der Putten, W. J., & Geurts, H. M. (2022). Parallel age-related cognitive effects in autism : A cross-sectional replication study. *Autism Research*, 15(3), 507-518. <https://doi.org/10.1002/aur.2650>
- Torricco, B., Chiocchetti, A. G., Bacchelli, E., Trabetti, E., Hervás, A., Franke, B., Buitelaar, J. K., Rommelse, N., Yousaf, A., Duketis, E., Freitag, C. M., Caballero-Andaluz, R., Martínez-Mir, A., Scholl, F. G., Ribasés, M., Itan, Battaglia, A., Malerba, G., Delorme, R., ... Toma, C. (2017). Lack of replication of previous autism spectrum disorder GWAS hits in European populations. *Autism Research*, 10(2), 202-211. <https://doi.org/10.1002/aur.1662>

- Tuchman, R., & Rapin, I. (2002). Epilepsy in autism. *The Lancet Neurology*, *1*(6), 352-358. [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(02\)00160-6](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(02)00160-6)
- Valle, A., Massaro, D., Castelli, I., & Marchetti, A. (2015). Theory of Mind Development in Adolescence and Early Adulthood: The Growing Complexity of Recursive Thinking Ability. *Europe's Journal of Psychology*, *11*(1), 112-124. <https://doi.org/10.5964/ejop.v11i1.829>
- Volkmar, F. R. (Éd.). (2013). Child Behavior Checklist 6–18. Dans *Encyclopedia of Autism Spectrum Disorders* (p. 581-581). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1698-3_100283
- Washburn, D., Wilson, G., Roes, M., Rnic, K., & Harkness, K. L. (2016). Theory of mind in social anxiety disorder, depression, and comorbid conditions. *Journal of Anxiety Disorders*, *37*, 71-77. <https://doi.org/10.1016/j.janxdis.2015.11.004>
- Wimmer, H., & Perner, J. (1983). Beliefs about beliefs : Representation and constraining function of wrong beliefs in young children's understanding of deception. *Cognition*, *13*(1), 103-128. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(83\)90004-5](https://doi.org/10.1016/0010-0277(83)90004-5)
- Wood, J. J., Drahota, A., Sze, K., Van Dyke, M., Decker, K., Fujii, C., Bahng, C., Renno, P., Hwang, W.-C., & Spiker, M. (2009). Brief report : Effects of cognitive behavioral therapy on parent-reported autism symptoms in school-age children with high-functioning autism. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, *39*(11), 1608-1612. <https://doi.org/10.1007/s10803-009-0791-7>
- Yang, J., Zhou, S., Yao, S., Su, L., & McWhinnie, C. (2009). The Relationship Between Theory of Mind and Executive Function in a Sample of Children from Mainland China. *Child Psychiatry and Human Development*, *40*(2), 169-182. <https://doi.org/10.1007/s10578-008-0119-4>
- Yoshida, W., Dziobek, I., Kliemann, D., Heekeren, H. R., Friston, K. J., & Dolan, R. J. (2010). Cooperation and Heterogeneity of the Autistic Mind. *Journal of Neuroscience*, *30*(26), 8815-8818. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0400-10.2010>
- Zander, E., Willfors, C., Berggren, S., Choque-Olsson, N., Coco, C., Elmund, A., Moretti, Å. H., Holm, A., Jifält, I., Kosieradzki, R., Linder, J., Nordin, V., Olafsdottir, K., Poltrago, L., & Bölte, S. (2016). The objectivity of the Autism Diagnostic Observation Schedule (ADOS)

in naturalistic clinical settings. *European Child & Adolescent Psychiatry*, 25(7), 769-780.
<https://doi.org/10.1007/s00787-015-0793-2>

